LES APPLICATIONS

DE

LA PHYSIQUE

PENDANT LA GUERRE

LES APPLICATIONS
DE
LA PHYSIQUE
PENDANT LA GUERRE

PAR

H. VIGNERON

Avec 224 figures

MASSON ET Cie, ÉDITEURS
ÉDITEURS DE "*LA NATURE*"
120, Boulevard St-Germain, Paris (VIe)
1919

AVANT-PROPOS

Ce livre, qui répond à tant de questions techniques restées sans réponse pour tous ceux que leurs fonctions n'avaient pas mis au nombre des initiés, aurait paru plus tôt si la censure ne s'y était opposée. Nous avons profité des délais que les circonstances nous ont imposés pour le compléter.

Autant que les problèmes purement militaires, les questions techniques ont passionné l'opinion publique et dominé pendant la guerre la conduite des opérations. — Aurions-nous les grenades les plus efficaces, les avions les plus puissants, les canons du plus gros calibre ? notre riposte aux attaques aériennes et aux incursions des sous-marins serait-elle prête en temps utile ? telles étaient les préoccupations générales.

Tout a été mis en œuvre pour le triomphe de notre cause et les informations filtrant lentement à travers les réticences de la censure ont permis de se rendre compte du labeur intellectuel énorme que les techniciens ont fourni.

Peu à peu on s'est aperçu qu'en marge des applications connues des sciences, il existait un domaine extrêmement riche, extrêmement varié, presque insoupçonné même de nos savants, domaine dans lequel les sciences les plus diverses sont mises à contribution : mécanique, optique, électricité, aérodynamique, etc., dont l'ensemble constitue l'art militaire.

Certes, dès avant 1914, les armes savantes, génie,

artillerie, possédaient des techniciens distingués, mais ils étaient seuls à connaître ces questions. Avouons-le donc, maintenant que la victoire nous est acquise, enfermés dans la Tour d'ivoire du Secret d'État, leur activité, sans cesse freinée par les bureaux, avait négligé un grand nombre de problèmes primordiaux.

Pendant quatre ans, sous l'impérieuse poussée des événements, les Sections techniques, jusqu'alors inaccessibles, se sont, pourrait-on dire, installées sur la place publique, faisant appel à tous, demandant secours aux inventeurs, entr'ouvrant pour eux les laboratoires, les champs d'expériences, les dossiers même.

Tout le monde s'est passionné pour ces questions, hier encore inconnues, et, de tous côtés, les informations et descriptions techniques plus ou moins exactes ont révélé l'existence de méthodes et d'appareils extrêmement curieux, et le stratège qui sommeille en tout Français s'est tout à coup doublé d'un inventeur.

Avant que de nouveau les sanctuaires officiels se referment et que les préoccupations de la vie économique détournent l'attention vers d'autres sujets, nous avons essayé de passer rapidement en revue les applications de la physique dans l'art militaire.

En exposant les applications nouvelles que la science physique a rencontrées au cours de cette guerre, nous pensons satisfaire plus qu'une curiosité banale. L'action réciproque que l'art de la guerre et les sciences physiques ont de tout temps exercée l'un sur l'autre, toute découverte nouvelle étant immédiatement appliquée à l'art militaire (aciers spéciaux, automobiles, aéroplanes, dirigeables, sous-marins, etc.) a été plus directe et plus riche pendant ces quatre dernières années qu'à aucune autre époque. En indiquant même sommairement les

voies où les événements militaires ont précipité les recherches de nos savants, nous saisirons un des moments les plus curieux de l'évolution des sciences appliquées. Pendant cette période, la collaboration de la science et de l'industrie, réclamée depuis si longtemps en France par les esprits les plus éclairés, a été véritablement complète.

Avant la guerre, tandis que les ingénieurs, les constructeurs, tous ceux que l'on classait sous le nom de « techniciens », cherchaient la solution des problèmes pratiques, les savants, les professeurs, les « intellectuels » isolés et loin des réalités discutaient dans le vide et expérimentaient dans le rêve.

La guerre les a forcés à se tourner délibérément vers la vie, à abandonner les recherches spéculatives ayant leur but en elles-mêmes, pour appliquer les ressources de la science aux problèmes matériels et pratiques, tout aussi riches en inconnues et tout aussi passionnants.

Tel mathématicien a été amené à calculer, non plus les trajectoires de corps de forme quelconque se déplaçant dans un milieu de résistance x, mais celles des obus réels tirés par les canons, et ses connaissances lui ont permis, par exemple, de résoudre le problème du repérage des batteries.

Tel autre, éminent électroniste, a passé de l'étude de la relativité et des quanta à celle du repérage des sous-marins, quittant le cabinet de travail pour l'arsenal.

Les physiologistes, délaissant le microscope et les cultures en tubes des laboratoires, ont attaqué et résolu les graves problèmes de la stérilisation des eaux, de l'hygiène aux armées et de la lutte contre les gaz asphyxiants, tandis que les chimistes sont passés des réactions dans les ballons ou les tubes à essais aux préparations indus-

trielles, par tonnes, des gaz asphyxiants et des explosifs nouveaux.

Espérons que cette collaboration féconde se poursuivra pour les œuvres de paix et que l'union de la science et de l'industrie, enfin réalisée, nous permettra de tenir dans le monde la place qui nous est due. Souhaitons donc que les grandes sociétés industrielles subventionnent les recherches scientifiques (1) et n'hésitent plus à s'adresser aux savants, avertis des réalités, pour la solution des problèmes techniques (2).

Nous avons tenté, dans chaque cas particulier, non seulement de montrer la diversité des appareils et des problèmes qui furent abordés, mais de rattacher l'exposé aux notions fondamentales qui se trouvent à la base de toute question de physique.

Ces applications constituent un remarquable commentaire et une excellente illustration des divers chapitres d'un cours de physique. Les quelques formules que nous avons cru devoir introduire découlent toutes de propositions classiques que nous avons rappelées.

Renseigner sur le principe des appareils, fournir des vues d'ensemble sur certaines doctrines peu connues, montrer par des exemples la diversité des applications de la physique au cours de cette guerre, tel a été notre but.

Paris, 30 *décembre* 1918.

(1) Comme la G. E. C. de Schenectady subventionnant les recherches théoriques de Langmuir et de ses collaborateurs sur les électrons.

(2) Rappelons que le gouvernement anglais s'est adressé à lord Kelvin pour diriger la pose du premier câble télégraphique transatlantique.

I

LA RECONNAISSANCE, LE REPÉRAGE ET LA SIGNALISATION OPTIQUES

LE PROBLÈME DE L'ÉCLAIRAGE

On avait, dès le temps de paix, prévu que les combats ne cesseraient pas avec la clarté du jour, mais on n'avait pas pensé, très certainement, que les attaques de nuit seraient si nombreuses, si répétées, et que, par suite de la guerre de tranchées, ce serait la nuit seulement que les soldats pourraient manœuvrer, renforcer les lignes, aménager de nouveaux ouvrages préparer le combat, en un mot que tous les mouvements se feraient la nuit, l'immobilité complète régnant pendant le jour. Aussi le matériel d'éclairage a-t-il pris un développement considérable, et le problème connexe de la visibilité nocturne des ouvrages et des hommes a-t-il dû être étudié en détail.

Les projecteurs électriques.

Un projecteur est, en principe, un miroir courbe au foyer duquel on installe une source ponctuelle très intense, dont les rayons lumineux, par réflexion, donnent un faisceau de lumière parallèle.

La nécessité du parallélisme des rayons issus de l'appareil est évidente, car si la zone éclairée est très étendue dans le

cas d'un faisceau divergent, c'est au détriment de l'intensité de l'éclairement.

Deux systèmes de miroirs permettent d'obtenir ce résultat :

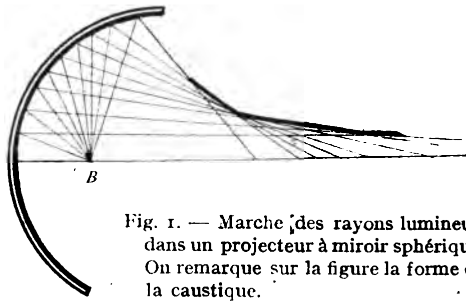


Fig. 1. — Marche des rayons lumineux dans un projecteur à miroir sphérique. On remarque sur la figure la forme de la caustique.

ce sont les miroirs sphériques et les miroirs paraboliques. Mais, comme on s'en rend compte en examinant les figures 1 et 2, qui donnent la marche des rayons lumineux dans les deux cas, par suite d'un phénomène appelé aberration de sphéricité, les rayons lumineux issus du foyer d'un miroir sphérique de grande ouverture ne sortent pas parallèlement à l'axe, ils se croisent en dessinant une courbe lumineuse appelée la caustique ; il est ainsi très difficile d'arriver, avec ces miroirs, à l'obtention d'un large faisceau cylindrique de lumière réfléchie. Au contraire, dans les miroirs à section parabolique, par suite d'une propriété générale bien connue de cette courbe, tous les rayons lumineux issus du foyer sortent rigoureusement parallèles.

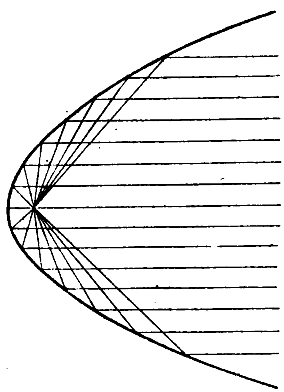


Fig. 2. — Marche des rayons lumineux dans un projecteur à miroir parabolique.

L'avantage en faveur du second système serait donc décisif, si la difficulté de construction n'en venait compliquer l'application. En effet, les surfaces sphériques s'obtiennent très facilement, par rodage mutuel d'une sphère pleine et d'une calotte creuse, la sphère étant applicable sur elle-même dans toutes les directions, tandis que le miroir parabolique ne peut être obtenu qu'en faisant tourner dans une orientation rigoureusement invariable les deux surfaces à conformer.

Les surfaces métalliques sont recouvertes d'un dépôt de métal poli, argent ou or, qui leur confère les propriétés réfléchissantes, les miroirs dorés, par suite de la qualité de la lumière qu'ils réfléchissent, étant les meilleurs, comme nous allons le voir.

En effet, la condition d'avoir un faisceau intense et par suite parallèle n'est pas la seule qu'il importe de remplir ; il faut encore que les objets éclairés soient rendus visibles.

Les conditions de visibilité. — Or, la visibilité dépend beaucoup des contrastes. Ainsi, un homme habillé en gris clair ou même en bleu est vu la nuit dans le faisceau d'un projecteur à une distance bien plus grande qu'un homme habillé en noir; par exemple, avec une puissance lumineuse de 8 000 bougies, on a trouvé les distances respectives de 350 mètres, 180 mètres, 125 mètres. C'est que, dans la nuit, le fond du paysage reste obscur et l'objet éclairé se détache sensiblement sur fond noir (sauf s'il est très près d'un mur), tandis que, pendant le jour, tout le fond du paysage est éclairé plus ou moins fortement.

Si on applique cette remarque aux uniformes de l'infanterie, on voit que les draps gris bleu, qui donnent un minimum de visibilité pendant le jour, sont bien moins favorables pour la nuit que des draps bruns ou bleu foncé, surtout si les projections sont faites par lumière électrique, plus riche en

rayons bleus et violets que les autres lumières artificielles.

Les Allemands avaient spécialement étudié la couleur de leurs uniformes, et, pour laid que soit le feldgrau, ce n'en est pas moins la meilleure teinte, la moins visible de jour et de nuit.

Pour rendre invisibles les dirigeables lorsqu'ils sont dans l'air, on cherche à recouvrir leurs enveloppes d'un enduit réfléchissant aussi fortement que possible toutes les couleurs, tandis que, pour les avions, les toiles doivent être aussi transparentes que possible.

La peinture à la poudre d'aluminium convient particulièrement bien dans le premier cas, car elle est impénétrable à la pluie et, de plus, n'en retient que des quantités infinitésimales par adhérence. Toutefois elle constitue un excellent conducteur d'électricité et les ballons qui en sont recouverts forment l'armature de véritables condensateurs électriques, ce qui peut présenter de sérieux dangers.

On a fait un certain bruit autour du « cellon » et des composés d'acétate de cellulose pour rendre transparentes les ailes des avions. Il ne semble pas, bien qu'au point de vue spécial de la visibilité les résultats aient été remarquables, qu'on ait continué dans cette voie. En effet, comme nous le verrons, les efforts auxquels sont soumises les toiles d'aéroplanes suppriment la possibilité d'utiliser actuellement de telles matières, si séduisant que puisse paraître à première vue leur emploi.

Les lumières monochromatiques donnent, par suite des défauts de correction de l'œil, une acuité visuelle supérieure aux lumières mélangées, aux lumières polychromatiques.

A ce point de vue, les projecteurs à miroirs dorés, qui conservent la partie la plus utile des rayons lumineux, tout en réduisant considérablement les rayons très réfrangibles, favorisent la visibilité.

Il importe d'ailleurs, pour augmenter les contrastes des ombres des objets éclairés, que la direction de visée des observateurs fasse un angle assez grand avec la direction du faisceau lumineux.

Cette condition est également favorable pour réduire l'éclairement latéral de la rétine, qui a une influence défavorable.

On a donc été conduit à adapter aux projecteurs terrestres les dispositifs employés dans les projecteurs de marine pour la commande à distance, l'asservissement, comme on dit en terme de métier.

Projecteurs asservis. — Le principe en est le suivant (fig. 3) : les mouvements sont assujettis à suivre ceux d'une alidade ou d'une lunette maniée par l'observateur placé, par

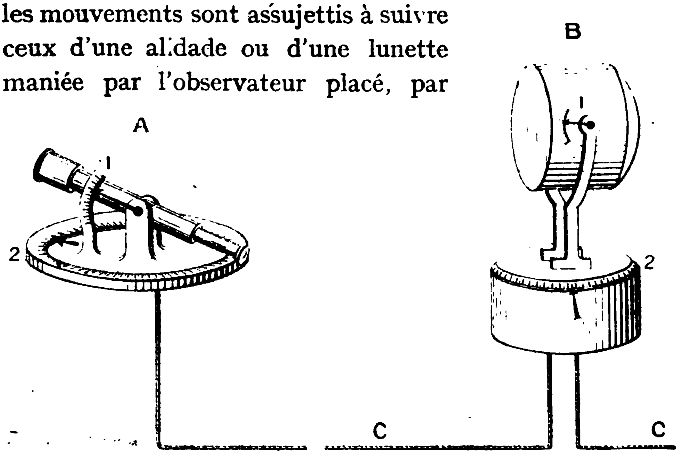


Fig. 3. — Principe du projecteur asservi : A, poste d'observation ; B, projecteur ; C, câbles électriques ; 1, commutateurs à frotteur du pointage en hauteur ; 2, ceux pour le pointage en direction.

exemple, à 100 mètres du projecteur. Celui-ci obéit docilement aux mouvements de la lunette, à laquelle son axe reste constamment parallèle, et on ne craint pas que le faisceau soit mal dirigé au moment où le feu est démasqué.

Les dispositifs électriques employés pour arriver à ce résultat sont assez variés; nous en décrirons deux particulièrement intéressants, celui de la maison Bréguet et celui de la maison Sautter et Harlé.

Le projecteur Bréguet (fig. 4 et 6) est pointé en direction par un moteur électrique commandé par deux relais inverseurs. La lunette de visée se déplace sur un plateau inverseur qui provoque le jeu des relais et fait tourner de l'angle nécessaire le moteur commandant la rotation du projecteur.

Cette rotation à son tour entraîne un commutateur qui agit sur un électro-aimant faisant tourner un moteur électrique, lequel entraîne aussi un plateau commutateur. Le mouvement s'arrête lorsqu'il y a concordance entre les deux commutateurs du récepteur et du poste de commande.

Le moteur du manipulateur n'obéissant pas directement, a toujours un retard sur celui du projecteur. L'inertie lui fait quelquefois dépasser la bonne position. Il se produit alors des balancements importants, qu'on évite au moyen d'un frein magnétique.

Le projecteur asservi de la maison Sautter et Harlé (fig. 5) fonctionne sur le principe du pont de Wheatstone. Il y a, en dérivation sur la source de courant, un rhéostat au poste et un autre au projecteur qui portent chacun un contact mobile solidaire de la lunette au poste et des mouvements de l'appareil au projecteur. Un conducteur relie ces deux contacts et traverse un galvanomètre. Quand les contacts des rhéostats sont sur des touches correspondantes, aucun courant ne passe dans le galvanomètre ; dans le cas contraire, le galvanomètre dévie d'un côté ou de l'autre et agit alors sur des contacts.

Ces contacts commandent les relais d'un commutateur inverseur qui actionne le moteur électrique de pointage,

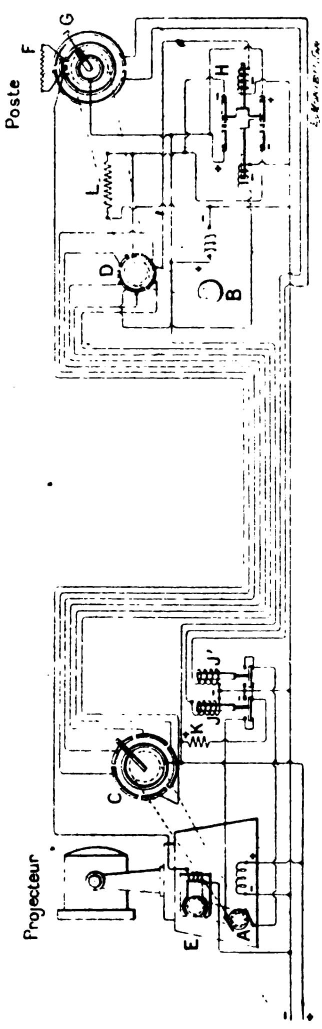


Fig. 4. — Projecteur asservi système Bréguet. — A, électromoteur pour pointage en direction ; B, électromoteur manœuvrant le commutateur à plots D ; C, commutateur à 5 plots manœuvré par A ; E, frein électromagnétique fermant A ; F, plateau inverseur portant l'alidade de visée G ; H, inverseur électromagnétique changeant le sens de rotation de B ; J, J', relais inverseurs pour le moteur A ; K, rhéostat d'induit de A ; L, rhéostat d'induit de B.

lequel marche jusqu'à ce que le contact mobile soit à la position voulue pour que le galvanomètre soit en équilibre.

Lorsque le déplacement de la lunette est très grand, une autre série de contacts assure le déplacement plus rapide du projecteur.

Ce dispositif se trouve réalisé en double : un pour le pointage en direction, l'autre pour le pointage en hauteur ; par conséquent, le poste de commande comprend simplement la lunette d'observation qui entraîne les frotteurs correspondant aux résistances de direction et de hauteur.

Lorsque le projecteur et le poste sont éloignés l'un de l'autre, le parallélisme parfait du projecteur et de la lunette fait que les champs respectifs ne coïncident pas ; c'est l'erreur de parallaxe, qui se corrige par une manette spéciale, laquelle décale le zéro.

Devant le projecteur sont placés des volets mobiles, qui, dans le projecteur Bréguet, sont ouverts par un petit moteur électrique et, dans le projecteur Sautter-Harlé, par un électro-aimant à longue course. Dans les premiers appareils, pour démasquer et masquer le feu du projecteur, on a commencé par allumer et éteindre la lampe elle-même ; mais, malgré des dispositifs spéciaux d'allumage rapide, il fallait plus d'une minute pour avoir une bonne lumière, et après l'extinction, les charbons, ardents encore, constituaient une cible pour l'ennemi.

Le faisceau est donc masqué par des volets ; il l'est en général pendant la plus grande partie de la nuit ; on a intérêt à diminuer pendant ce temps la consommation des charbons, par suite l'échauffement de l'appareil. La réduction de consommation des charbons a une grande importance, car pendant leur remplacement le projecteur est inutilisable.

Pour cela, automatiquement au moment de l'occultation,

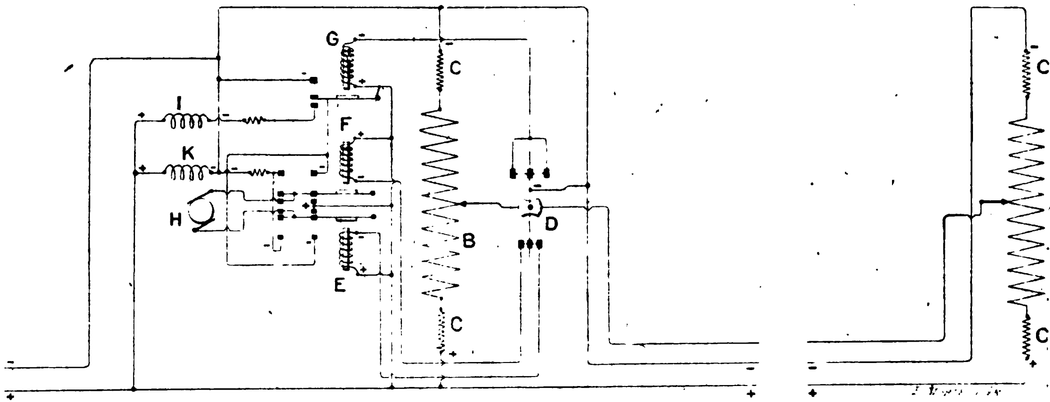


Fig. 5. — Pointage en direction du projecteur asservi système **Sautter-Harlé**. (Le même **dispositif** est répété pour le **pointage en** hauteur.) — A, rhéostat **du poste; B, rhéostat du projecteur**; C, **résistances à fin de course**; D, galvanomètre; E, F, relais **du commutateur inverseur; H, moteur commandé par le commutateur inverseur**; G relais d'accélération de H; K, inducteur du moteur H; I, inducteur **supplémentaire** mis en **circuit par** G.

un relais met en circuit une résistance supplémentaire et la lampe est mise en veilleuse ; l'effet inverse se produit à l'ouverture des volets : ce dispositif permet de maintenir



Fig. 6. — Projecteur asservi, système Bréguet.

le projecteur allumé toute une nuit sans remplacer les charbons.

Le poste de commande et le projecteur portent des cercles divisés qui permettent de repérer le but et de commander éventuellement le tir.

La figure 7 représente l'un des derniers types de projecteurs. Il se compose d'un élévateur électro-pneumatique muni de roues et attelé comme une remorque derrière l'automobile qui porte l'ensemble du groupe électrogène et du projecteur de 90 centimètres de diamètre.

L'élévateur est constitué par un tube télescopique dont l'extension est obtenue par de l'air comprimé. L'air comprimé est produit par un compresseur actionné électriquement, fixé à la partie inférieure du tube.

Le foyer lumineux du projecteur se trouve ainsi élevé à $11^{m},50$ au-dessus du sol.

Le projecteur est porté par une



Fig. 7. — Projecteur monté sur un mât extensible.

plate-forme à laquelle l'opérateur, en cas de besoin, a accès par une échelle de corde.

Auto-projecteurs. — Mais les projecteurs ne peuvent être souvent installés à poste fixe. Il faut que l'on puisse les déplacer rapidement suivant les besoins de commandement. Aussi les auto-projecteurs se sont-ils de plus en plus multipliés (fig. 8).

La voiture proprement dite ne diffère en rien, comme

forme générale, des automobiles ordinaires. Elle comporte un châssis normal pourvu seulement d'une plate-forme remplaçant la carrosserie. Le moteur, de 18 chevaux, permet une vitesse de 30 kilomètres à l'heure. La seule différence qui existe avec les véhicules ordinaires réside dans l'emploi

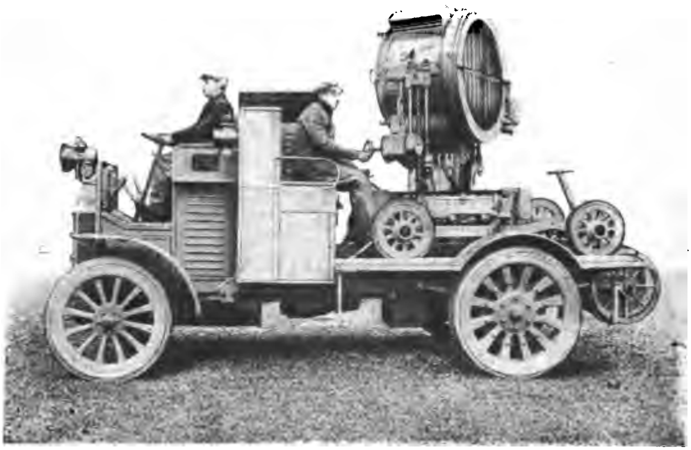


Fig. 8. — Le projecteur monté sur son camion automobile.

d'une dynamo accouplée directement au moteur de la voiture et fournissant 110 ampères sous 90 volts à la vitesse de 1 250 tours par minute environ. Pendant la marche, l'induit de la dynamo tourne à vide, remplissant ainsi l'office de volant. Dès que la voiture est arrivée à destination, on débraye les organes mécaniques ; le moteur et la dynamo constituent un groupe électrogène au service exclusif du projecteur. La dynamo est donc calée directement sur l'arbre du moteur, entre celui-ci et le cône d'embrayage.

Le projecteur est constitué par un cylindre pourvu, à l'arrière, d'un miroir métallique parabolique de 90 centimètres. Au foyer de ce projecteur, devant la lentille, se trouve

la lampe à arc ; son régime est de 110 ampères sous 50 à 54 volts. Le cylindre porte à l'avant un appareil d'occulta-

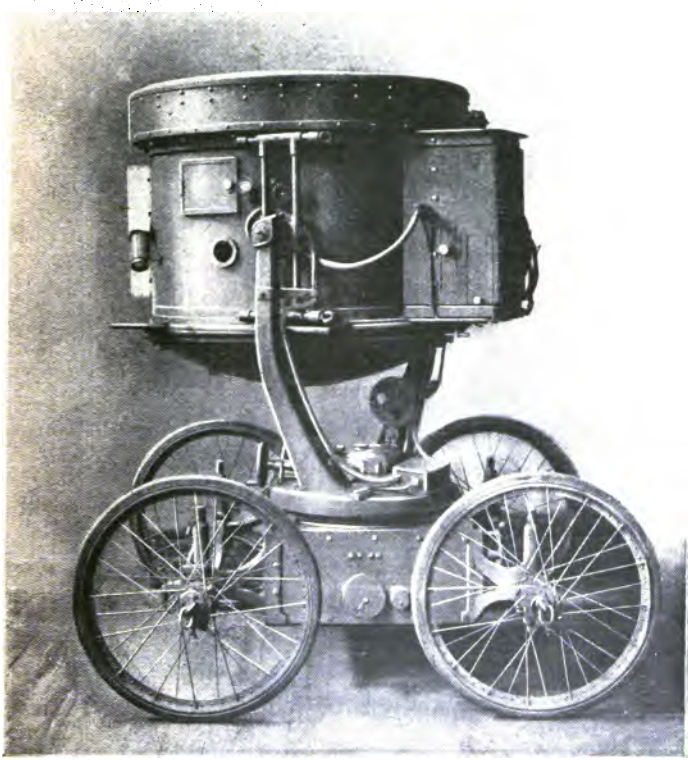


Fig. 9. — Projecteur orienté verticalement pour fouiller le ciel.

tion formé de volets verticaux pourvus de leviers sur lesquels agit une crémaillère.

Le développement de l'aviation et la nécessité de scruter le ciel la nuit pour y déceler les dirigeables et les avions ont

conduit à construire des projecteurs ayant un champ vertical très étendu. Le problème n'est pas si facile qu'il en a l'air, et un simple changement de l'axe d'oscillation ne le résout pas. C'est qu'en effet il faut éviter que les parcelles de charbon incandescent et les cendres de l'arc ne tombent sur la pellicule réfléchissante du miroir, qui sans cela deviendrait terne et serait rapidement mis hors de service. La difficulté a été résolue et la figure 9 représente un des nombreux projecteurs antiavions en service sur le front.

Les vols de nuit des avions ont aussi posé un problème d'éclairage très intéressant. Quand un avion atterrit, il arrive en général au voisinage du sol avec une vitesse de 70 à 80 kilomètres à l'heure et sous un angle de 20 à 30°. On comprend aisément que le pilote, qui se rapproche du sol à une telle allure, et doit, lorsqu'il est à 5 ou 6 mètres au-dessus du terrain, redresser son appareil pour venir se poser sans heurt, ait un besoin impérieux de voir nettement le sol pour pouvoir manœuvrer à temps ses gouvernails. C'est ce qui rend si difficile le vol nocturne ; aussi a-t-on cherché à éclairer le terrain ou tout au moins à le munir de dispositifs lumineux permettant de le retrouver facilement d'abord et ensuite d'atterrir dans les meilleures conditions. Nous en dirons quelques mots au sujet des vols de nuit.

Les phares destinés à renseigner les navigateurs aériens doivent avoir une forme et une direction telles qu'ils n'aveuglent pas l'aviateur et ne lui fassent pas commettre d'erreur sur la nature et l'étendue du terrain d'atterrissage. En général, les verres des phares aériens sont étudiés de telle sorte qu'une partie du faisceau lumineux balaie l'horizon, tandis que l'autre, aux rayons plus divergents, éclaire le ciel dans un plan vertical, ce qui permet à des aviateurs volant à des altitudes différentes de reconnaître le signal.

Les sources lumineuses sont l'électricité ou l'acétylène

et l'intensité varie de 10 000 bougies au voisinage des villes ou des agglomérations à 8 000 environ en rase campagne, loin de tout foyer parasite.

Les phares ne sont pas seulement à feux fixes, il y en a à feux clignotants, comme les phares côtiers, et qui permettent non seulement d'attirer l'attention des aviateurs en vol, mais encore de les renseigner sur le terrain survolé.

Projecteurs Sperry. — Les perfectionnements des projecteurs semblaient ne devoir porter que sur des améliorations de détail et les constructeurs cherchaient uniquement à augmenter leur puissance en accroissant la densité du courant circulant dans les charbons, lorsque la Cie Sperry présenta vers 1916 un projecteur, établi sur des principes totalement nouveaux, qui amena dans cette industrie une véritable révolution, comparable à celle produite, dans l'industrie de l'éclairage, par l'apparition des lampes à filament métallique.

Le principe nouveau consiste à réaliser le point lumineux par des gaz incandescents dans le cratère du charbon positif. Mais le fonctionnement est différent de celui d'un arc à flamme ordinaire, car, en poussant l'intensité, la partie centrale de la flamme jaillissant du négatif acquiert une puissance et une vitesse suffisantes pour maintenir les vapeurs dans le cratère; à partir de ce moment, ce dernier devient extraordinairement brillant, ce qui le différencie nettement d'un arc à charbons ordinaires. Toutefois, si la flamme n'est pas correctement dirigée ou si des précautions spéciales ne sont pas prises, les bords du cratère se rongent par places, ce qui permet aux gaz de s'échapper en diminuant le rendement lumineux.

Quelques chiffres permettront de fixer les idées sur les résultats obtenus : tandis qu'avec un arc jaillissant entre

deux électrodes ordinaires en charbon on obtient pour le cratère un éclat intrinsèque sensiblement constant de 170 bougies par millimètre carré, dans l'arc Sperry le même éclat atteint jusqu'à 500 bougies par millimètre carré.

Un autre avantage de l'arc Sperry sur les anciens dispositifs est la grande réduction de la surface du cratère. On peut concentrer la vapeur dans un cratère ayant une surface beaucoup plus petite que le cratère d'un arc ordinaire absorbant la même intensité, ce qui réduit l'angle de divergence du faisceau lumineux dont les éléments deviennent très sensiblement parallèles. Dans le projecteur du type de 150 ampères et miroir de $1^{m},5$ de diamètre, le charbon positif a un diamètre de 16 millimètres seulement et le cratère un diamètre un peu moindre. Le diamètre du charbon négatif est de 11 millimètres et ce charbon avec son petit support ne projette que peu d'ombre sur le centre du miroir, augmentant ainsi la proportion de lumière réfléchie.

Donnons, pour terminer, quelques détails techniques sur ce remarquable projecteur dont la figure 10 donne la vue d'ensemble de la lampe.

Le corps de celle-ci contient un moteur shunt (fig. 11) entraînant d'une part un ventilateur centrifuge et d'autre part un train d'engrenages, commandant les mouvements de rotation du charbon positif et de réglage de l'arc. Le ventilateur envoie de l'air par des tubes aux porte-charbons positif et négatif. L'air envoyé dans le porte-charbon positif est chassé entre un certain nombre de disques réfrigérants qui entourent l'extrémité du porte-charbon la plus voisine de l'arc. Le charbon positif est animé d'un mouvement de rotation au moyen d'un arbre vertical et d'une vis sans fin qui le relient au moteur. Une petite manivelle, portant une couronne dentée qui engrène avec un pignon placé sur l'arbre

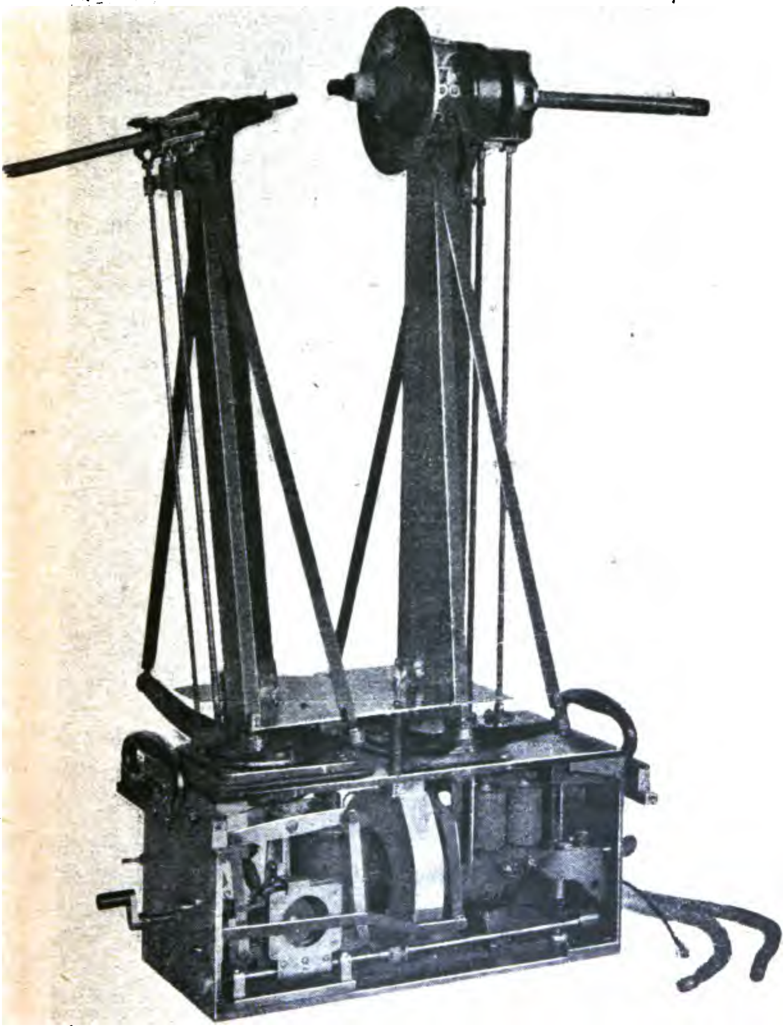


Fig 10. — La lampe du projecteur Sperry.

vertical, permet de faire tourner les charbons à la main en cas de besoin (fig. 12). Le réglage du positif est obtenu au moyen de l'arbre vertical par une commande thermostatique des électro-aimants.

Le thermostat est monté sur le tambour du projecteur et il est disposé de telle sorte que lorsque, en brûlant, le charbon positif s'éloigne du foyer du miroir, la lumière provenant de la divergence du faisceau qui en résulte frappe le thermostat dont il fait varier la résistance. Des relais entrent aussitôt en jeu, produisant la mise en marche du mécanisme de réglage du charbon positif, jusqu'à ce que le cratère soit de nouveau revenu au foyer. A cette commande automatique du charbon positif est adjointe une commande à main.

Le réglage du charbon négatif est commandé par un électro-aimant relié directement aux bornes de l'arc et qui fait déplacer le charbon dans un sens ou dans l'autre suivant que la tension augmente ou diminue. Une commande à main est également adjointe à cette commande automatique. L'allumage se fait à l'aide d'un électro-aimant série qui écarte le porte-charbon négatif tout entier au moment où le courant est envoyé dans la lampe à travers les charbons.

La commande à distance du projecteur se fait à l'aide d'un petit poste renfermé dans une boîte en bronze de $75^{mm} \times 75^{mm}$ en hauteur et en largeur et de 125 millimètres de longueur pour un poids de 3 kilogrammes environ. Un index pourvu d'une poignée de 15 centimètres de longueur sort de la boîte ; il suffit de le maintenir dans la direction de visée pour qu'aussitôt un ingénieux combinateur provoque la mise en marche des moteurs d'orientation et d'inclinaison disposés dans le socle du projecteur.

Pour obtenir cette source de lumière extrêmement concentrée et pour produire en même temps une quantité de vapeur suffisante pour remplir le cratère positif, une combus-

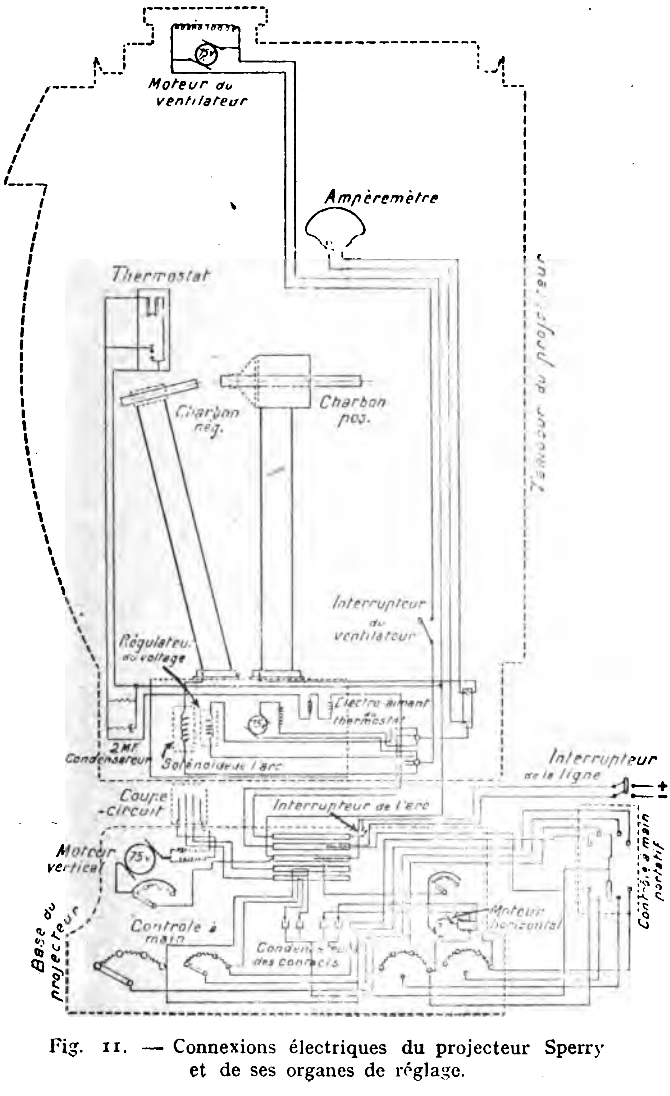


Fig. 11. — Connexions électriques du projecteur Sperry et de ses organes de réglage.

tion rapide de l'électrode positive est nécessaire. Aussi les charbons positifs sont beaucoup plus longs que ceux utilisés antérieurement et atteignent une longueur de 1m,10 dans le cas de l'arc de 150 ampères.

Bien qu'on ait été conduit à employer des charbons spéciaux dans la lampe Sperry, le vrai problème a consisté dans l'établissement d'une lampe convenable pour l'utilisation de ces charbons. En raison de la sensibilité et des caractéristiques spéciales de l'arc, des conditions nouvelles ont été introduites, augmentant le nombre de celles auxquelles doivent satisfaire les lampes de ce genre.

De ces conditions la plus importante fut la nécessité de refroidir les charbons. Ce refroidissement fut jugé nécessaire pour empêcher les charbons de se consumer trop vite.

On a déjà employé une méthode de refroidissement des charbons, consistant à entourer les extrémités des charbons près de l'arc par une flamme d'alcool (projecteur Beck) qui, en raison de sa température relativement basse, protège les charbons contre une oxydation trop rapide et les empêche de brûler en pointe.

Dans l'arc Sperry, le refroidissement du charbon positif est obtenu au moyen d'un fort courant d'air produit par une petite turbine placée dans le corps de la lampe. L'air refoulé par cette turbine est amené par les bras creux de la lampe jusqu'aux porte-charbons qui sont pourvus d'ailettes de refroidissement en faisant partie intégrante.

Le charbon positif tourne dans son porte-charbon afin de conserver pendant le fonctionnement un cratère uniforme dans lequel des vapeurs incandescentes puissent être convenablement maintenues. Si le charbon ne tourne pas, le bord supérieur du cratère brûle et la vapeur incandescente s'échappe aussitôt formée (fig. 13).

Signalons enfin, sans entrer dans des détails trop spéciaux,

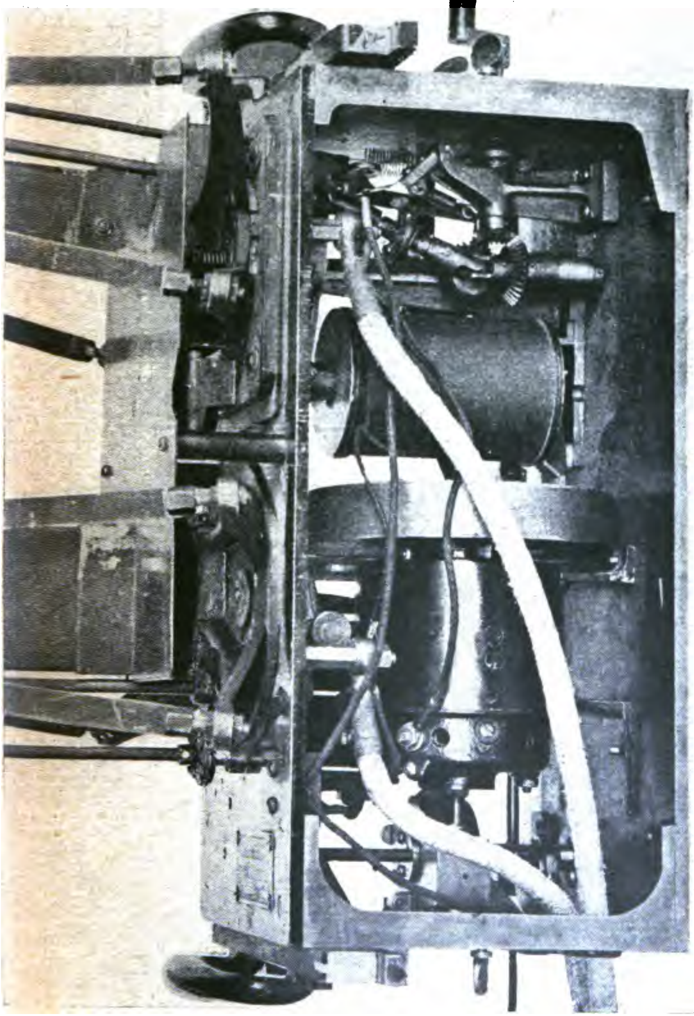


Fig. 12. — Vue du mécanisme de ventilation et de commande des charbons.

que les nouvelles sources lumineuses de grande intensité ont permis d'orienter dans des voies nouvelles l'emploi des projecteurs terrestres, en particulier des projecteurs antiavions.

Dans ce cas, en effet, le pinceau étroit qui est nécessaire sur mer pour déceler l'ennemi à grande distance ou les petits

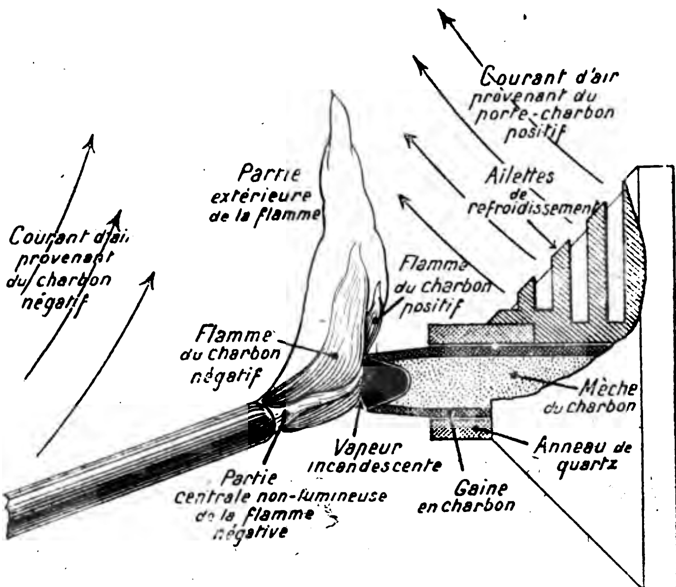


Fig. 13. — Schéma du fonctionnement de la partie éclairante du projecteur Sperry.

navires, est dans le cas présent nuisible. L'avion va si vite, se meut à des altitudes si variées que seul l'éclairement total du ciel permet de l'apercevoir, de le suivre et de l'attaquer.

Aussi, renonçant aux projecteurs à faisceau parallèle, a-t-on étudié des projecteurs divergents, donnant un cône lumineux de large ouverture qui permet d'éclairer, jusqu'à une assez grande altitude, une portion étendue de l'espace.

La télégraphie optique dans les tranchées.

Les communications à moyenne distance, dans les opérations où le temps manque pour installer des lignes téléphoniques, peuvent être assurées à l'aide de signaux optiques.

Les Allemands possédaient un matériel très important : projecteurs portatifs, héliographes, lunettes d'observation, etc. La portée de ces appareils est de quelques kilomètres, et ils peuvent être utilisés non seulement la nuit,



Fig. 14. — Un poste allemand de télégraphie optique.

mais encore en plein jour. En effet, il suffit, pour pouvoir communiquer à distance par la télégraphie optique, que l'instrument d'observation soit dirigé rigoureusement dans la direction du faisceau lumineux du dispositif émetteur. Plus le faisceau lumineux est étroit, plus le réglage est difficile, mais aussi plus le secret des communications est assuré, car un observateur situé sur le côté du faisceau, même à quelques mètres seulement, ne peut intercepter les signaux.

La figure 14 montre un système particulièrement portatif employé dans l'armée allemande : les signaux sont produits par une lampe électrique disposée à l'intérieur d'un tube qui permet l'orientation exacte du faisceau lumineux.

Une jumelle solidaire de ce système sert au soldat pour recueillir les réponses de son correspondant. Les piles servant à alimenter le petit projecteur sont placées dans une ceinture visible également sur la figure.

Le prisme trièdre. — Lorsqu'un faisceau lumineux tombe sur un système de deux miroirs plans rectangulaires, perpen-



Fig. 15. — Appareils portatifs allemands de télégraphie optique.

diculairement à l'arête commune de ces miroirs, il est réfléchi et renvoyé dans une direction rigoureusement parallèle à sa direction d'incidence, comme l'indique la figure 16, et cela quelle que soit l'orientation du système par rapport au faisceau. C'est une proposition classique en optique élémentaire et sur laquelle les Allemands se sont appuyés pour établir un ingénieux appareil de télégraphie optique.

Supposons en effet que le faisceau d'un projecteur soit dirigé vers une colline, un clocher, un observatoire quelconque, dans lequel se trouve un correspondant muni d'un système optique qui, dans la pratique, est formé par trois miroirs (ou mieux trois prismes à réflexion totale) dont les trois surfaces réfléchissantes forment trois plans rectangulaires (un trièdre trirectangle). Quelle que soit l'orientation de cet appareil, pourvu toutefois qu'il soit approximativement dirigé vers la source lumineuse, il renverra un faisceau lumineux exactement dans la direction du projecteur. Un observateur qui sera placé à

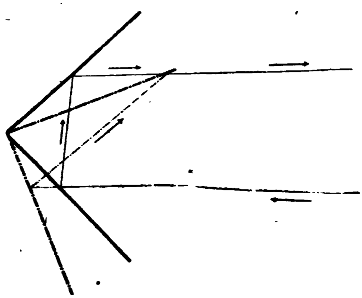


Fig. 16. — Marche des rayons dans le réflecteur à prisme trièdre.

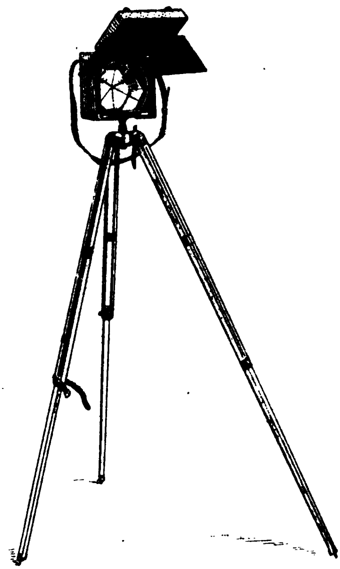


Fig. 17. — L'appareil monté sur son pied.

côté du projecteur verra donc un point brillant, une petite étoile, s'allumer dans le cône de lumière de son appareil. Si le correspondant, à l'aide d'un volet, masque le trièdre, il pourra télégraphier optiquement en faisant se succéder des éclairements longs ou brefs suivant un code convenu.

Les avantages de ce système de communication sont évidents : il n'est plus besoin pour le transmetteur de trans-

porter une source lumineuse ni de régler avec soin la direction du faisceau de sa lampe ; pourvu qu'il dirige son appareil vers le projecteur, il est sûr que le correspondant recevra son message. Le secret de la correspondance est d'autre part assuré, puisque le faisceau réfléchi est renvoyé rigoureusement dans la direction du projecteur et que, à un ou deux degrés à droite ou à gauche, on ne reçoit pas les rayons en retour. La figure 17 montre un appareil portatif allemand construit sur ce principe. On voit le prisme logé dans une petite boîte et le volet servant à intercepter la lumière pour l'échange des signaux. La figure 18 montre un appareil à six prismes destinés à transmettre dans toutes les directions simultanément. Ces dispositifs sont employés en mer pour la transmission des ordres secrets que l'on ne veut envoyer par télégraphie sans fil, etc.



Fig. 18. — Le réflecteur à prismes trièdres multiples.

Les engins éclairants.

Les fusées. — Les projecteurs électriques ne peuvent être employés dans les tranchées, et cependant, durant les longues heures de la nuit, la lumière, si fugitive qu'elle soit, est encore la meilleure garantie contre les surprises de l'ennemi.

Pour réaliser cet éclairage « élémentaire », pourrait-on dire, il ne semble pas que l'on se soit mis en frais d'imagination, et les fusées volantes des fêtes foraines sont restées,

tout au moins pendant une grande partie de la guerre, les seuls engins employés avec les grenades éclairantes.

Dans toute capacité contenant un fluide sous pression, s'il n'y a pas d'orifice, les parois se trouvent soumises à une pression uniforme : il y a équilibre. Si on pratique une ouverture en un point, le fluide s'échappera, et la somme des pressions, qui était nulle auparavant, aura une résultante égale et directement opposée à la valeur qu'avait la pression sur les surfaces que l'on vient de supprimer. C'est le principe des fusées.

Le problème de l'artificier consiste à donner à la fusée une forme intérieure qui permette la formation spontanée d'une grande quantité de gaz, sans cependant qu'il y ait explosion. Le profil adopté est représenté figure 19 : un tube cylindrique en carton très épais (l'épaisseur des parois est de 1 centimètre environ) est rempli de pulvérin (poudre très fine) fortement comprimé au maillet ou à la presse, de façon à présenter le profil indiqué. On y arrive en tassant la poudre à l'aide de mandrins creux de forme spéciale autour d'une pièce métallique appelée « broche » qui, lorsqu'elle sera retirée, laissera un vide appelé l'« âme » de la fusée.

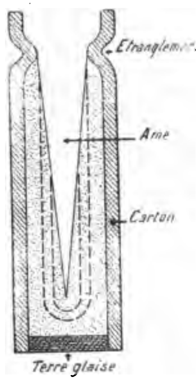


Fig. 19. — Coupe schématique d'un cartouche de fusée.



Fig. 20. — Une fusée d'artifice.

A son extrémité libre, la fusée présente un étranglement, réalisé soit en comprimant le carton, comme l'indique la figure, soit en mettant un bloc de terre glaise qui bouche la fusée et est percé d'un trou de dimension convenable. On réalise ainsi une sorte de tuyère grossière, qui permettra aux gaz de la poudre de sortir en plus grande vitesse et par suite de donner une meilleure propulsion.

Lorsque le feu a été mis, à l'aide d'une mèche à étoupille par exemple, à l'artifice que nous venons de décrire et qui porte, en terme de métier, le nom de « cartouche propulsif », la combustion de la poudre s'effectue comme l'indique le pointillé de la figure 19. Au fond de l'âme, là où la pression est la plus grande parce qu'on est loin de l'orifice, la combustion est plus rapide. Si même l'orifice est insuffisant, la pression au fond du cartouche peut s'élever à tel point que le régime de combustion de la poudre devient explosif : le cartouche éclate.

C'est, d'ailleurs, une des grosses difficultés rencontrées dans la fabrication de ces sortes d'artifices, car le régime optimum de marche de la combustion est celui qui est le plus voisin, mais sans l'atteindre, de la déflagration. Aussi, la moindre réduction dans le diamètre de l'orifice, 1 millimètre, par exemple, suffit pour provoquer l'éclatement, tandis que si l'orifice est, par contre, de 1 millimètre plus large, les gaz s'échappent sans force et la fusée ne s'enlève pas.

Pour assurer la direction de la fusée et de la charge qu'elle emporte, que cette charge soit une « flamme » d'artifice avec ou sans parachute, ou un engin explosif quelconque, contenus dans tous les cas dans un « coffre » analogue à celui représenté figure 20, on la munit à son extrémité d'une « baguette » très longue, puisque, dans les fusées de 37 millimètres de diamètre extérieur, elle atteint $2^{m},04$. Cette baguette joue le rôle d'un empennage rudimentaire.

On comprend facilement, d'après ce court exposé, que les fusées soient très perfectibles : non seulement la tuyère, dans laquelle on fait se détendre les gaz de la poudre, est primitive et ne tient pas compte de l'expérience maintenant acquise dans la construction des organes analogues des turbines à vapeur, mais encore l'empennage date d'une époque où les avions n'existaient pas et où les lois de la résistance de l'air étaient inconnues. Aussi de grands perfectionnements, multipliant par 5 ou 6 l'efficacité des fusées ordinaires, en ce qui concerne la portée et la charge enlevée, ont été réalisés depuis le début de la guerre.

Théorie des fusées. — Les fusées utilisent pour leur propulsion la réaction des gaz de la poudre sur l'air environnant. En termes mathématiques, ce qui intervient dans leur propulsion, c'est la quantité de mouvement du volume gazeux émis par la poudre (1).

Si les moteurs à réaction, comme les turbines à vapeur, sont très économiques, il n'en est pas de même des fusées ordinaires ; le poids qu'elles emportent est très petit : la plus grosse fusée courante, dont le diamètre du « cartouche » propulsif est de 34 millimètres, ne porte guère plus de 350 à 400 grammes, et sa hauteur d'ascension ne dépasse pas 300 mètres.

	Calibres de :			
	14mm	20mm	27mm	34mm
Diamètre extérieur.......	22mm	31mm	42mm	54mm
Longueur................	140mm	200mm	270mm	340mm
Poids de poudre dans la fusée non compris la composition de chasse.........	60gr	96gr	140gr	266gr
Poids emporté par la fusée.	30gr	67gr	108gr	300-350gr
Longueur de la lorgnette....	84cm	120cm	162cm	204cm

Donnons quelques indications sur la théorie mathématique des fusées, afin de situer le problème et de montrer

(1) C'est-à-dire le produit mv, m étant la masse gazeuse et v sa vitesse.

les voies dans lesquelles on peut en chercher la solution.

La force de réaction de la fusée est égale, avons-nous dit, à la quantité de mouvement des gaz qui s'échappent de son orifice. Or la vitesse v de sortie des gaz est fonction de la pression P qui règne à l'intérieur de la fusée, de la température T des gaz et de leur nature, ainsi que de la surface de l'orifice de sortie. La théorie donne la formule qui relie ces quantités :

$$\text{Débit} = S \frac{K\sqrt{P}}{\sqrt{T}},$$

K étant un coefficient dépendant de la densité des gaz et de leur chaleur spécifique.

Le calcul indique aussi que la vitesse d'écoulement à la sortie d'une tuyère dépend du rapport de détente de celle-ci $\left(\frac{\text{pression initiale dans la fusée}}{\text{pression dans l'orifice de sortie}}\right)$, mais que, lorsque ce rapport dépasse une valeur moyenne de 20, la vitesse ne croît plus que très lentement. Il suffisait donc d'avoir une poudre brûlant sous une pression de 25 à 30 kilogrammes dans la fusée et de faire sortir les gaz dans l'atmosphère à une pression de $1^{kg},2$ à $1^{kg},5$.

Mais ici intervient la question de rapidité de combustion de la poudre qui est de la forme : $v = AP^n$.

On voit donc qu'il faut trouver une poudre ayant une grande vitesse de combustion (1 à 2 secondes pour une fusée), sans que pour cela la pression développée atteigne les valeurs où le régime devient explosif.

Les poudres noires ont fourni des solutions assez heureuses, mais une autre voie mériterait d'être suivie : c'est, au lieu d'augmenter la vitesse de sortie des gaz, d'accroître la masse des produits expulsés de la fusée.

Obus éclairant. — Les artilleurs utilisent parfois

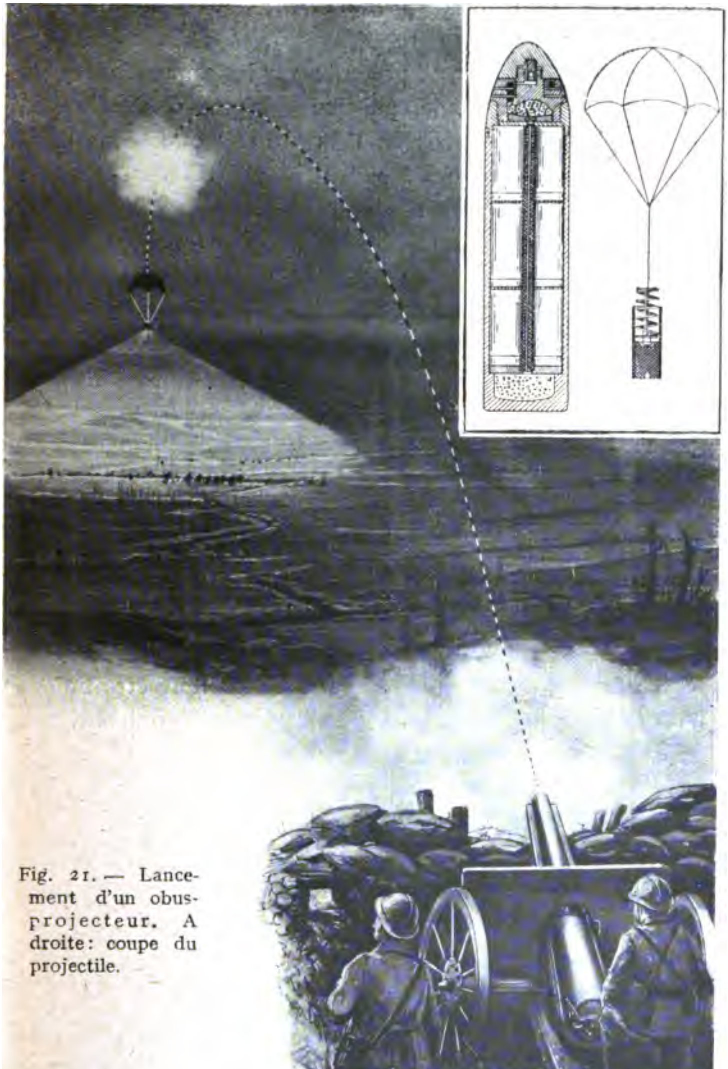


Fig. 21. — Lancement d'un obus-projecteur. A droite : coupe du projectile.

un obus à lumière qui éclaire une vaste étendue de terrain.

Ce système d'éclairage présente sur les appareils actuels un très sérieux avantage, puisque l'origine d'émission de la lumière devient invisible ; l'ennemi se trouve dans l'impossibilité absolue de découvrir le point de départ de l'engin et de régler son tir sur lui pour le détruire.

L'obus se présente sous la forme d'un projectile ordinaire ; il comporte un gros feu de Bengale très lumineux (à base de magnésium) fortement relié à un parachute qui s'ouvre dès que le projectile, en éclatant, expulse l'engin.

Lorsqu'il est bien développé, et le mélange éclairant bien allumé, une vive lumière est projetée sur le sol pendant plusieurs minutes, ce qui permet d'observer, sans danger, une large surface de terrain.

Les Allemands se servent aussi de projecteurs portatifs, dont le principe est le même que celui des projecteurs électriques, mais où la source lumineuse est une lampe à acétylène, comme dans les phares d'automobile.

Pour les reconnaissances nocturnes par engins aériens, on a construit des artifices éclairants pouvant être lancés d'un avion aussi bien que d'un dirigeable, et qui ont, sur tous les projecteurs, cet avantage de ne donner à l'adversaire aucun indice sur la situation réelle de l'appareil aéronautique qui l'utilise et qui demeure invisible.

L'une de ces fusées éclairantes, qu'employèrent nos ennemis, se compose de trois parties : un étui, un parachute ralentissant la descente de l'engin abandonné librement dans l'air, et la matière éclairante proprement dite avec son dispositif d'allumage.

L'étui, en fer-blanc, contient un parachute auquel sont attachés cinq tubes éclairants. Par un système de friction, une mèche s'allume et met le feu aux cinq tubes, qui commencent

à se consumer lentement, tandis que la colonne ascendante d'air et de gaz chauds qu'ils dégagent contribue à augmenter l'action sustentatrice et retardatrice du parachute.

Cette fusée éclairante, lancée en général d'une hauteur de 500 à 600 mètres, s'éteint alors avant d'atteindre le sol, après avoir éclairé pendant quatre à cinq minutes, — ce qui permet une soigneuse observation, — 20 000 mètres carrés de terrain.

Éclairage des terrains d'aviation. — Dans certains champs d'aviation on a utilisé, pour guider les vols de nuit, le dispositif suivant : au milieu du champ affleure une plaque de verre de 1 mètre de côté environ, puissamment éclairée par-dessous à l'aide de lampes à incandescence placées en sous-sol. Autour de cette plaque éclairée, quatre lampes, ou groupes de lampes rouges semblablement disposées, sont placées aux quatre points cardinaux, de façon à former un carré de 80 mètres de côté.

Ces lampes sont commandées électriquement par une girouette. Si la vitesse du vent près du sol est nulle, seule la plaque blanche sera éclairée et toutes les lampes rouges seront éteintes. Si le vent souffle, par exemple, du nord, la lampe rouge du nord est éclairée et l'aviateur sait qu'il doit, pour atterrir contre le vent, revenir au sol suivant la direction plaque blanche-lampe rouge. Si le vent souffle d'une direction intermédiaire, nord-est par exemple, les deux lampes du nord et de l'est sont allumées et l'aviateur vient couper la ligne réunissant les deux lampes, pour atterrir.

Nous venons de voir comment on repérait un terrain d'atterrissage, et en même temps nous avons signalé les difficultés du vol de nuit. Divers systèmes ont été proposés pour faciliter l'atterrissage dans l'obscurité ; nous allons en dire quelques mots.

Pour que le pilote puisse effectuer ses manœuvres d'atterrissage à coup sûr, il faut qu'il sache :

1° Dans quelle situation il est par rapport à l'aérodrome ou au champ d'atterrissage ;

2° A quelle hauteur il se trouve au-dessus de la terre ;

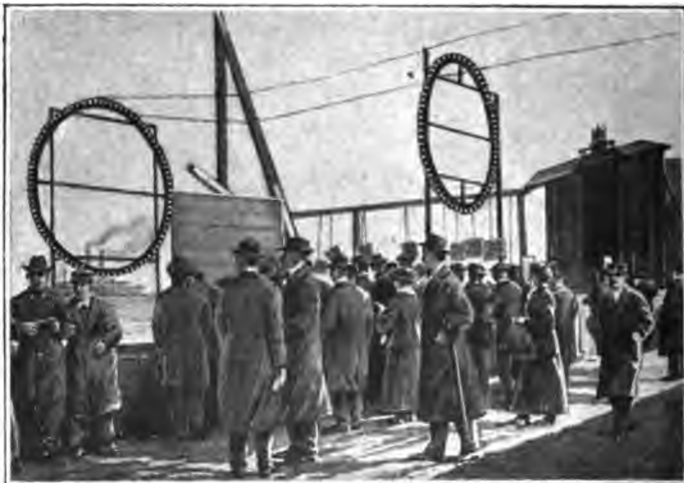


Fig. 22.

3° Quelle est la direction du vent à terre (ceci pour éviter d'être pris en travers ou en arrière par le vent quand il roule sur sa lancée et de chavirer ou capoter).

Quelques mois avant la guerre, un Allemand, König, a imaginé un dispositif à circonférences lumineuses qui tend à résoudre les deux premières difficultés.

Le principe est le suivant. Deux cercles formés de lampes à incandescence sont situés dans des plans parallèles, leurs centres étant sur une même horizontale, à une hauteur telle que cette horizontale passe par l'œil du pilote lorsque les avions (fig. 22) sont sur le sol. La figure 23 montre

schématiquement comment les cercles se présenteront en perspective à l'œil du pilote suivant la position qu'il occupe dans l'espace et le renseigneront par leur déformation apparente et leur position relative sur sa direction par rapport au signal lumineux et aussi sur sa hauteur au-dessus du sol.

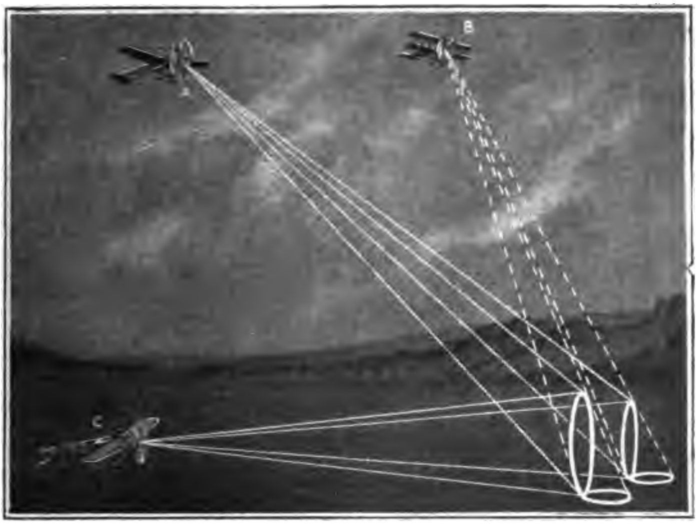


Fig. 23.

On se rend facilement compte qu'un aviateur survolant ces cercles à une hauteur quelconque les apercevra sous des angles différents et que la perspective les lui fera voir dans diverses positions. S'il se trouve en face, les deux cercles lui apparaîtront réguliers; s'il est placé sur le côté, il verra deux ellipses dont le grand axe sera vertical, tandis que les ellipses seront dirigées dans le sens horizontal s'il les observe d'une certaine hauteur. A un moment donné, quand le pilote tournera autour de ce signal pour reconnaître sa direction, les deux figures se superposeront, se couperont, en donnant des

indications supplémentaires pour savoir la position par rapport à la direction de leurs centres.

La figure 24 montre des positions relatives des deux cercles par rapport à l'aéroplane. Le premier diagramme est

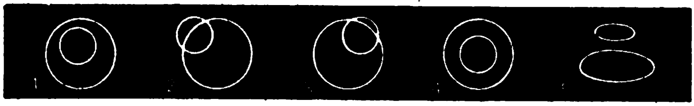


Fig. 24.

celui du signal pour un avion piquant droit sur le terrain d'atterrissage, un instant avant d'atteindre le sol ; le second indique que l'avion appuie un peu trop sur la gauche ; le troisième, que l'appareil est trop sur la droite ; le quatrième est la position de l'atterrissage parfait ; dans le dernier, l'avion s'est élevé à une petite hauteur au-dessus des cercles.

En France, on a cherché à guider le pilote en créant, à l'aide de lampes à très gros filaments métalliques consommant plusieurs dizaines d'ampères et nécessitant par suite tout un dispositif de réfrigération, une nappe de lumière à quelques mètres au-dessus du sol en les plaçant dans des réflecteurs horizontaux paraboliques.

L'aviateur étant en descente sait que, sitôt qu'il pénétrera dans la zone lumineuse, il sera, par exemple, à 5 mètres du sol, et il n'aura qu'à cabrer son appareil pour atterrir.

Toute une série de solutions plus ou moins bonnes ont d'ailleurs été proposées, les services techniques laissant malheureusement trop fréquemment les aviateurs chercher eux-mêmes les dispositifs qui leur font défaut.

LA TÉLÉVISION

Ce n'est pas tout que d'apercevoir un objectif, il faut encore en discerner les moindres détails, et cela à des distances qui dépassent de beaucoup les bornes de l'observation visuelle. Ce programme est celui que cherche à remplir l'optique pratique, et le prolongement de la vue a fait l'objet, au cours de cette guerre, de très nombreuses applications de principes de physique jusque-là utilisés seulement dans les appareils scientifiques de laboratoire ou dans des cas très particuliers.

Le moyen le plus simple qui se présente à l'esprit est le grossissement de l'image qui vient se former sur la rétine de l'œil. Remarquons que le grossissement de l'image n'implique rien quant aux dimensions mêmes de l'objet. Celui-ci peut nous paraître petit, ou parce qu'il l'est en réalité, ou parce qu'il est très éloigné de nous. Dans le premier cas, nous ferons appel au microscope, dans le second cas aux appareils télescopiques. Le problème de la vision est d'ailleurs excessivement complexe et fait intervenir les plus subtiles notions de physique et de physiologie.

Mais il est d'autres moyens que le grossissement géométrique de l'image qui permettent d'augmenter la puissance de vision de notre œil. Si cette première solution est d'ordre « mécanique », pourrait-on dire, et est bien connue (lunettes à fort grossissement, jumelles de campagne, jumelles à prisme), il n'en est pas de même des procédés « physiologiques » dont nous allons indiquer le principe. C'est ainsi que l'on a remarqué que plus est grande la sensation de relief dans un paysage que l'on examine, c'est-à-dire plus on a augmenté, à l'aide d'un artifice approprié, la distance qui sépare les deux yeux, plus la vision est distincte. Il suffit

d'avoir regardé les photographies stéréoscopiques pour avoir eu cette sensation. Si on examine par le même procédé deux photographies d'un même objet, un paysage par exemple, obtenues avec un appareil photographique simple, mais prises de deux points de vue différents, situés à 10 mètres l'un de l'autre, on constatera que la sensation de relief est considérablement exagérée. Tout se passe, lorsqu'on regarde la photographie, comme si l'on examinait le paysage avec des yeux distants l'un de l'autre de 10 mètres ! Les télescopes-reliefs et les lunettes-ciseaux sont basés sur ce phénomène.

La vision colorée. — Enfin, tout le monde connaît l'impression très particulière que produit la vision à travers des verres colorés. Si on examine un paysage à travers un verre rouge par exemple, même par temps sombre, il prend une teinte vive. L'impression est différente suivant la teinte du verre, bleu, vert, jaune, etc., mais, dans tous les cas, un observateur attentif remarquera certains détails qui apparaissent avec une grande vigueur, tandis qu'en lumière naturelle on à peine à les discerner. La vision colorée, qui éteint certaines couleurs et au contraire en avive d'autres, peut donc, sinon augmenter la puissance de vision, tout au moins favoriser l'observation. L'élimination de certaines radiations du spectre permet aussi de prendre des photographies plus nettes, dans lesquelles les lointains, généralement flous, et qui ont une si grande importance à la guerre, deviennent d'une vigueur remarquable.

La jumelle à prismes.

Les jumelles ordinaires, dites lunettes de Galilée, comprennent, comme toutes les lunettes, un objectif formé d'une lentille convergente et un oculaire composé d'une lentille divergente, ou de plusieurs verres convenablement achro-

matisés, c'est-à-dire choisis pour éviter l'irisation des images par suite de la décomposition de la lumière blanche en un spectre coloré par les masses de verre ainsi interposées sur son trajet.

Lunette terrestre. — Dans une telle lunette, le grossissement

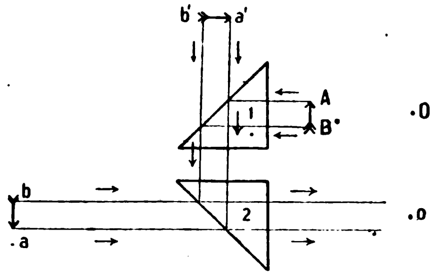


Fig. 25. — Comment s'opère le redressement de l'image dans une lunette à prisme.

est mesuré par le rapport des distances focales de l'objectif et de l'oculaire; c'est dire que, pour avoir un grossissement

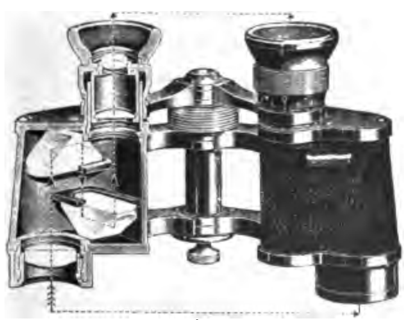


Fig. 26. — Marche des rayons lumineux dans une jumelle à prisme.

notable, on est conduit à donner à l'appareil une longueur incommode.

On évite cet inconvénient en redressant l'image produite par l'objectif par une série de réflexions totales sur des ensembles

formés chacun de deux prismes rectangulaires disposés comme l'indique la figure 25. Les rayons lumineux issus de l'objet AB pénètrent à travers la face 1 du premier prisme et sont réfléchis sur sa face hypoténuse dans une direction rectangulaire. Ils semblent alors provenir d'un objet virtuel *a'b'* qui est symétrique de AB par rapport à cette face. Ils pénètrent ensuite dans le second prisme, se réfléchissent de même à sa sortie, semblent être émis par un objet virtuel *ab* symétrique de *a'b'* par rapport à la face hypoténuse du deuxième prisme. En pratique, les deux prismes sont accolés l'un à l'autre et constituent un prisme unique.



Fig. 27. — Une lunette à prisme monoculaire.

Un second système de deux prismes accolés renvoie finalement le rayon lumineux vers l'oculaire, comme le montre la figure 26. Le chemin total qu'il a parcouru

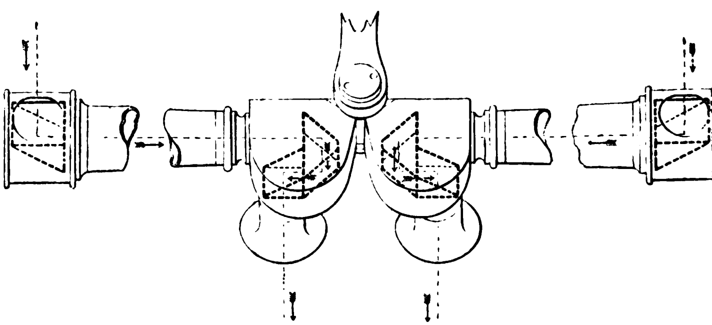


Fig. 28. — Marche des rayons lumineux dans une lunette-ciseau.

est donc égal au triple de la hauteur de la jumelle, c'est dire que celle-ci correspond à une lunette terrestre ordinaire dont la longueur serait trois fois plus grande. De plus, la

distance qui sépare les pupilles d'entrée étant supérieure à celle qui sépare les oculaires, — et qui est égale à la distance entre les deux yeux de l'observateur, — l'effet stéréoscopique se trouve augmenté (1). Nous allons voir comment



Fig. 29. — Une lunette-viseur allemande.

on peut encore l'exagérer. On arrive alors à la jumelle-ciseau ou au télescope-relief.

Lunette-ciseau. — Dans ces instruments, les deux prismes à réflexion totale, au lieu d'être très proches l'un de l'autre, sont au contraire largement séparés, de façon que le déplacement latéral du rayon lumineux soit considérable. On arrive à ce résultat par une combinaison de prismes et de

(1) Si B est l'écartement de la base, e l'écartement des yeux, g le grossissement de la lunette, l'effet stéréoscopique est donné en première approximation par l'expression

$$E = \frac{Bg}{e}.$$

Ceci veut dire que si D est la distance maxima à laquelle, avec un instrument, on puisse reconnaître que deux objets placés dans le prolongement de la direction de vision ne sont pas sur le même plan, grâce à l'effet stéréoscopique, cette distance maxima devient DE.

lentilles. La figure 28 représente la marche des rayons lumineux dans un de ces appareils dont la figure 29 donne une photographie.

Il importe parfois, pour les nécessités militaires, de pou-



Fig. 30. — Une lunette-ciseau allemande disposée derrière un arbre.

voir faire varier à volonté l'importance de la déformation volontaire que l'on fait ainsi subir aux images. En d'autres termes, il est désirable de pouvoir rapprocher les deux lentilles-objectifs. Mais ce mouvement ne pourrait être réalisé commodément par un déplacement pur et simple des oculaires parallèlement à eux-mêmes et on préfère monter chacune des branches de la jumelle sur une articulation dont l'axe est parallèle à l'axe optique de l'oculaire. Dans ces

conditions, on obtient ce que les artilleurs appellent les



Fig. 31. — Vue d'une lunette-ciseau de batterie allemande.

lunettes-ciseaux et dont la figure 30 montre un type.

Un des avantages de cette sorte de jumelle est de pouvoir

non seulement faire varier à volonté le relief de l'image, mais encore de voir sans être vu, puisque l'œil de l'observateur se trouve à un niveau inférieur à celui des objectifs qui peuvent déborder l'abri derrière lequel il se défile (fig. 30). On se

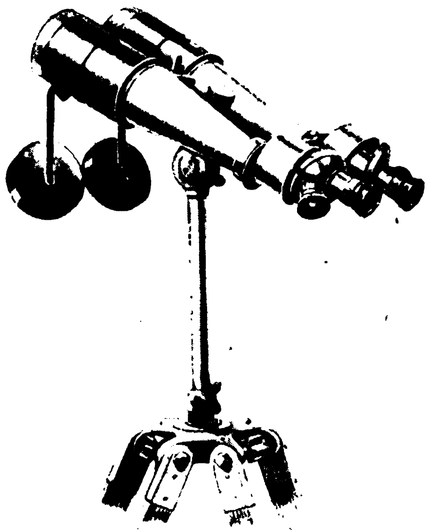


Fig. 32. — Lunette à deux grossissements.

trouve alors avoir en même temps un périscope stéréoscopique. De petite taille, en général, ces périscopes peuvent atteindre, dans certains cas, de grandes dimensions, lorsqu'on veut en munir des observatoires d'artillerie. La figure 31 montre un matériel d'observation allemand avec le périscope installé.

Une modification de la lunette est représentée figure 32. C'est une jumelle ordinaire, mais dans laquelle l'écartement des axes des objectifs est supérieur à l'écartement des yeux. Un prisme de Crova disposé dans la monture permet de

ramener l'écartement des faisceaux incidents à cette dernière valeur. Les figures 33 et 34 montrent la marche des faisceaux et le détail des prismes de Crova.

Chaque ensemble — prismes de Crova et oculaire — peut tourner autour d'un axe, *a* ou *a'*, de façon à réaliser l'écartement des oculaires à volonté.

Les Allemands, par exemple, pour pouvoir surveiller les deuxièmes lignes de tranchées et augmenter la surface du terrain découvert, ont aussi utilisé un grand épiscope dont la hauteur, variable suivant les besoins, peut atteindre 25 mètres.

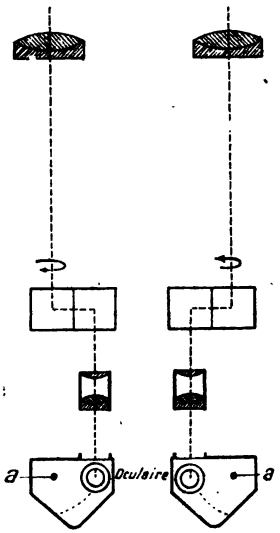


Fig. 33. — Marche des rayons dans la lunette stéréoscopique.

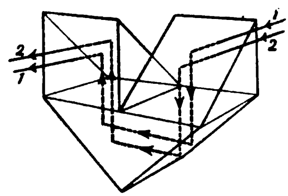


Fig. 34. — Marche des rayons lumineux dans le prisme de Crova.

La figure 35 montre un de ces appareils en position et, en cartouche, la marche des rayons lumineux, ainsi que la disposition du véhicule mobile que l'on déplace dans le tube suivant la hauteur à laquelle on a élevé le système objectif.

Les périscopes.

Le problème que cherchent à résoudre les périscopes, terrestres ou marins, est le même : voir sans être vu. Pour

cela, l'appareil doit reporter à un niveau inférieur l'image formée par un système optique approprié.

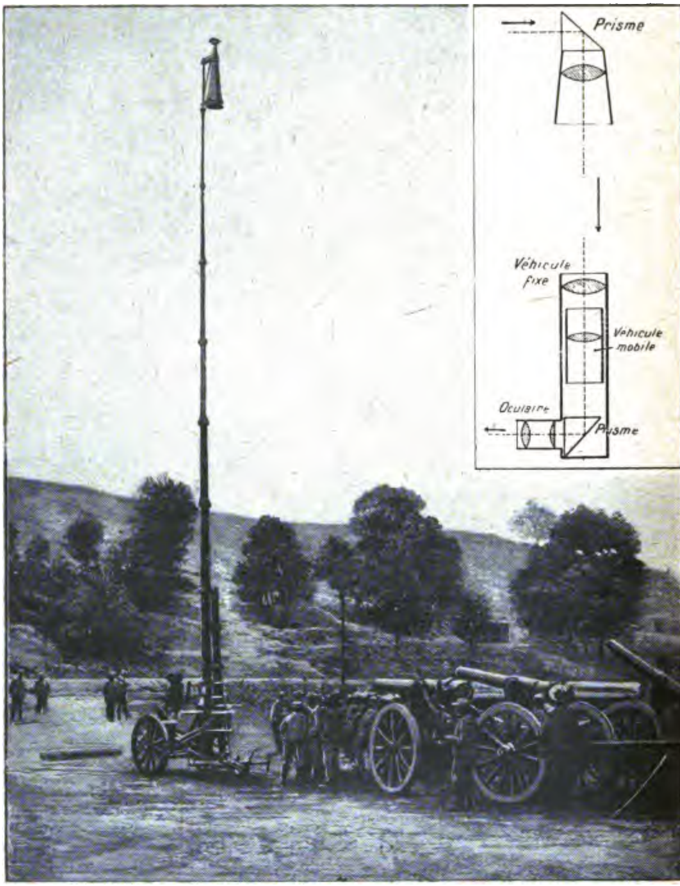


Fig. 35. — Le grand périscope allemand de 25 mètres. En cartouche, le dispositif optique employé.

Périscopes de tranchée. — L'idée la plus simple qui se présente à l'esprit est d'employer une glace inclinée à 45°

La PRESSE MÉDICALE est le seul journal français qui, dans ses colonnes embrasse l'ensemble des travaux médicaux publiés dans le monde et, qui, grâce, à une organisation méthodique, en donne un compte rendu détaillé dans le délai le plus rapide.

Des *Mouvements médicaux* et des *Mouvements chirurgicaux*, demandés à des collaborateurs particulièrement qualifiés pour les écrire, donnent plusieurs fois par mois un exposé d'ensemble de toutes les questions à l'ordre du jour.

Chaque numéro contient une chronique, plusieurs mémoires originaux, des articles de médecine et de chirurgie pratiques, les comptes rendus des Sociétés Savantes françaises et étrangères, des Congrès, des analyses de tous les travaux français et étrangers, des informations, des nouvelles, des bibliographies, etc.

DIRECTION SCIENTIFIQUE

J. L. FAURE
Professeur à la Faculté,
Chirurgien de l'hôpital Cochin.

A. GOUGET
Professeur à la Faculté,
Médecin de l'hôpital Beaujon.

F. DE LAPERSONNE
Professeur de Clinique ophtalmologique,
Membre de l'Académie de Médecine.

M. LETULLE
Professeur à la Faculté,
Médecin de l'hôpital Boucicaut,
Membre de l'Académie de Médecine.

M. LERMOYEZ
Médecin de l'hôpital Saint-Antoine,
Membre de l'Académie de Médecine.

H. ROGER
Doyen de la Faculté de Paris,
Médecin de l'Hôtel-Dieu,
Membre de l'Académie de Médecine.

F. WIDAL
Professeur de Clinique médicale
à l'hôpital Cochin,
Membre de l'Académie de Médecine.

CH. LENORMANT
Professeur agrégé,
Chirurgien de l'hôpital Saint-Louis.

F. JAYLE
Chef des trav. clin. de gyn.
à l'hôpital Broca.
Secrétaire de la Direction.

ARTICLES ORIGINAUX RÉCENTS

Prof. Henri Hartmann : Le cancer de l'estomac. — M. Loeper et M. Binet : La mesure de l'activité d'un suc gastrique par son action hémolytique. — J. L. Roux-Berger : Chirurgie du genou : ménisques, ligaments croisés, cartilages articulaires. — G. Lyon : Les traitements nouveaux de la grippe. — F. Legueu : L'azotémie des rétentionnistes urinaires. — G. Leven : Les *petits signes* de l'aérophagie. — A. J. Louis Brocq : Lichen plan des muqueuses et leucoplasies. — Raulot-Lapointe et Etienne Sorrel : Exploration radiologique du gros intestin. — Mauclaire : Les greffes osseuses pour réparer les pertes de substance diaphysaire dans les cas de plaies de guerre. — Etc., etc.

COMPTES RENDUS DES SÉANCES

de l'Académie de Médecine, de l'Académie des Sciences, de la Société nationale de Chirurgie, de la Société de Neurologie, de la Société Médicale des hôpitaux, de la Société de Biologie, de la Société de Pédiatrie, de la Société de Dermatologie, de la Société de Thérapeutique, de la Société de Médecine légale, de la Société d'obstétrique, de la Société des Chirurgiens de Paris, de la Société de Médecine de Paris, de la Société de Pathologie comparée, de la Société de Radiologie médicale de France, de la Société Anatomique et des principales Sociétés de Province.

CHRONIQUES

J. L. Faure : L'enseignement de la chirurgie. — H. R. : L'enseignement de la médecine devant le Sénat. — G. Heuyer : De la nécessité de l'examen psychiâtrique des enfants anormaux à l'école.

sur la direction des rayons incidents supposés horizontaux. Cette glace renvoie le faisceau dans une direction perpendiculaire, qui sera verticale par conséquent. Si on la redresse alors par une autre glace à 45°, on aura obtenu l'effet cherché. C'est le principe employé dans le périscope des



Fig. 36. — Quelques types d'épiscopes ou « périscopes des poilus ».

poilus, représenté figure 35, dû à l'initiative privée et qui a rendu au début de la guerre, alors que n'existait dans l'armement réglementaire aucun appareil de ce genre, des services inappréciables aux soldats.

Mais le périscope à glaces est loin d'être parfait. En effet, si on trace la marche des faisceaux lumineux dans un tel appareil, on constate que, pour embrasser un champ suffisamment grand, il faut donner aux glaces des dimensions consi-

dérables et n'avoir entre ces deux glaces qu'une distance relativement très petite, environ 50 centimètres. Ce sont là des conditions qui limitent singulièrement l'emploi du périscope des poilus, et on a été conduit à réaliser des appareils plus perfectionnés, basés sur d'autres principes.

Périscopes de marine. — C'est alors que l'on a construit des périscopes de tranchée, dont l'objectif très petit est formé par un système de lentilles, tout comme dans les périscopes marins. Mais le problème est alors beaucoup moins simple. Il s'agit de reporter l'image formée par l'objectif, à travers un tube relativement très étroit, jusqu'à l'oculaire, placé à une distance de plusieurs mètres dans les derniers modèles de périscopes. Comme l'image donnée par l'objectif doit être renvoyée vers le bas, on la fera réfléchir par un prisme à réflexion totale (fig. 37). Le faisceau lumineux qui semble alors provenir d'un point vertical, situé au-dessus de l'appareil à une hauteur égale à la distance de l'objet à l'objectif, ne pourra être reçu par l'oculaire, et par suite par l'œil, que s'il n'est pas arrêté par les parois du tube cylindrique de l'appareil. Si l'on veut avoir un champ acceptable, il faut donc « rassembler » les rayons lumineux, les concentrer en quelque sorte et les « véhiculer » à travers le tube de façon qu'ils ne le rencontrent pas. Dans ces conditions, on pourra avoir un champ de vision suffisant. C'est le rôle des deux

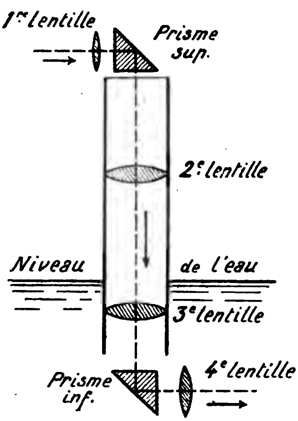


Fig. 37. — Disposition des divers éléments d'un périscope de marine.

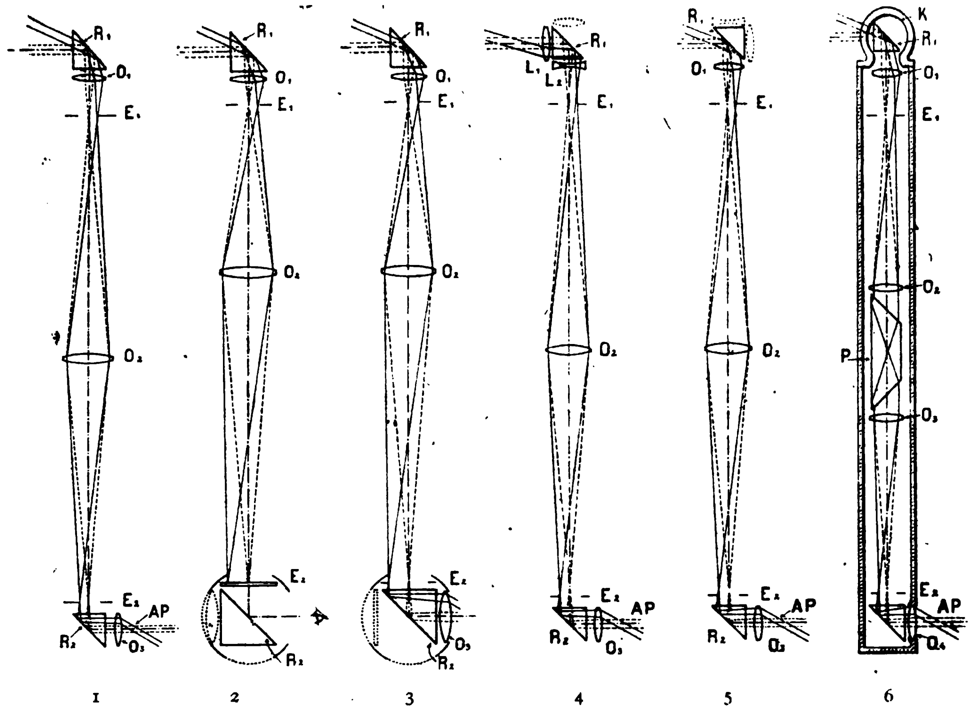


Fig. 38. — 1. Périscope simple. — 2. Périscope combiné. Examen de l'image réelle formée sur le verre dépoli. — 3. Périscope combiné. Examen de l'image virtuelle par oculaire grossissant. — 4. Périscope téléobjectif disposé pour la vision amplifiée. — 5. Périscope à téléobjectif disposé pour la vision ordinaire. — 6. Périscope panoramique.

lentilles, ou véhicules, interposées dans le tube du périscope.

La marche des rayons lumineux est indiquée figure 38. Si simple qu'elle soit en apparence, la solution n'en est pas moins très compliquée et le problème du périscope est un des plus difficiles que les opticiens aient à résoudre. On aura une

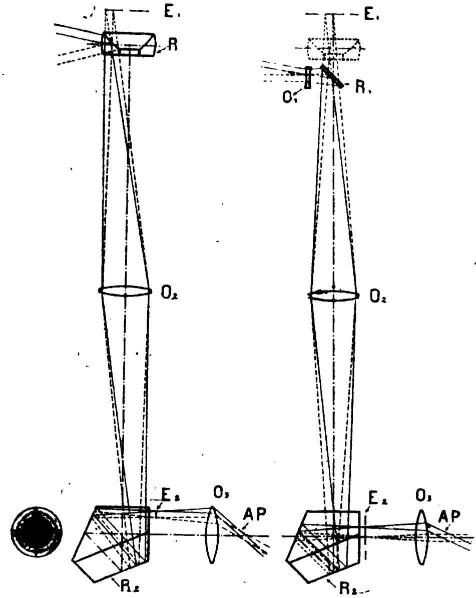


Fig. 39. — 1. Périscope à image annulaire. — 2. Périscope central.

idée de sa complexité en examinant rapidement les différentes combinaisons optiques utilisées dans la marine allemande (fig. 38 et 39).

La plus simple (fig. 38, *1*) consiste à monter un prisme à réflexion totale R, à l'extrémité d'un tube d'acier de 6 mètres de long. Ce prisme renvoie les rayons lumineux venus de l'extérieur vers un objectif O_1 de court foyer qui donne une image dans le plan E_1. Cette image est projetée par une seconde lentille O_1 dans le plan E_2 et redressée par le prisme R_2.

L'oculaire O_3 légèrement grossissant (grossissement 1,5 environ) en permet l'examen. Ce grossissement est nécessaire pour que l'œil ait l'illusion de voir les objets visés en grandeur naturelle et à leur distance réelle. En faisant tourner le tube portant le périscope, on explore successivement toutes les régions de l'horizon (fig. 38).

Si ce périscope donne des images très claires, il ne permet pas de distinguer nettement les différents plans, et comme on ne peut examiner qu'avec un seul œil, l'observateur se fatigue très rapidement.

Le périscope combiné (fig. 38, *2*) se prête à l'examen binoculaire, mais non pas stéréoscopique. C'est-à-dire que l'image réelle est projetée sur un verre dépoli comme l'image d'un paysage se forme sur l'écran de la chambre noire photographique. On peut donc l'examiner directement, ce qui est un avantage, mais on ne peut, pas plus que dans le périscope précédent, situer exactement les objets en profondeur.

Cet appareil ne se différencie du précédent que par la partie inférieure, construite de manière à fournir soit une image réelle sur la glace dépolie E_2, image qui est réfléchie par la face hypoténuse argentée du prisme R_2, soit une image virtuelle que l'on examine alors à l'aide d'un oculaire approprié O_3. Pour permettre l'un ou l'autre des modes d'observation, l'écran dépoli et le prisme sont montés dans un tambour à axe horizontal, qu'il suffit de faire tourner de 180° pour passer d'un mode de vision à l'autre.

Le grossissement de 1,5, qui est réalisé dans les appareils précédents, est souvent insuffisant pour discerner certains détails. Aussi a-t-on cherché à augmenter le grossissement sans nuire cependant dans de trop grandes mesures à l'intensité lumineuse de l'image. On y est parvenu en ajoutant, devant l'objectif normal, un téléobjectif constitué, comme

tous ces systèmes optiques, d'une lentille convergente L_1, et d'une lentille divergente L_2. On obtient ainsi des images de dimensions plus grandes qu'avec l'objectif normal, sans pour cela modifier la longueur du tube. Comme dans les périscopes précédents, une rotation de 180° d'un tambour portant l'objectif ordinaire et le téléobjectif permet de passer de la vision d'une image ordinaire à la vision d'une image amplifiée (fig. 38, *4* et *5*).

Enfin, les périscopes précédents, qui donnent de bons résultats sur terre, sont insuffisants en marine, car ils ne permettent pas de procéder à un rapide examen de tout l'horizon : il faut 5 à 10 secondes avant que l'instrument ait accompli une révolution, et la manœuvre exige un certain effort, car, en raison des pressions qui s'exercent sur le manchon, l'étanchéité n'est assurée qu'au moyen de joints très serrés. De plus, l'observateur est obligé de se déplacer en même temps que l'oculaire, qui tourne, comme l'objectif, autour du même axe vertical. En effet, si l'on se bornait à faire tourner le sommet de l'instrument, l'image s'inclinerait aussitôt que les hypoténuses des prismes cesseraient d'être parallèles ; un quart de tour ferait paraître l'horizon vertical, et un demi-tour montrerait les objets renversés sens dessus dessous. Pour maintenir l'image droite sans déplacer l'oculaire, il a fallu interposer un prisme redresseur dont le mouvement combiné avec celui de l'objectif compense à chaque instant la déviation.

Périscope panoramique. — C'est sur ce principe qu'est fondé le périscope panoramique (fig. 38, *6*) dont le tube est fixe et porte à son sommet une cloche de verre K contenant un prisme à réflexion totale R_1 monté sur un manchon que l'on peut faire tourner à l'aide d'une manivelle. Les rayons réfléchis traversent l'objectif O_1, dont le plan focal est en E_1. Un second objectif O_2 a également son foyer en E_2 : il

s'ensuit que les rayons issus de cette lentille sont parallèles. Ils traversent alors le prisme tétraèdre redresseur P, puis une troisième lentille O_3 qui projette en E_3 l'image que l'on examine à l'aide de l'oculaire O_4 et du prisme R_2.

Sur la monture du prisme redresseur (fig. 40) est un pignon conique III qui engrène avec deux crémaillères dentées I et II dont la première est adaptée au tube portant le prisme triangulaire supérieur. Les engrenages sont calculés de telle sorte que le déplacement angulaire du prisme redresseur soit la moitié de celui du prisme supérieur. Les images restent ainsi constamment droites.

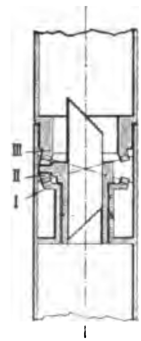


Fig. 40. — Monture du prisme redresseur.

Pour observer successivement tous les points de l'horizon, il suffit de faire tourner le tube intérieur, monté à billes dans son manchon, de sorte que la rotation s'opère sans fatigue pour l'observateur, qui n'a pas à se déplacer, l'oculaire demeurant immobile.

Cependant, si rapide que soit la manœuvre, elle ne permet pas encore d'embrasser d'un coup d'œil l'espace environnant : dans les cas où une surveillance assidue doit s'exercer dans toutes les directions, il ne faut pas que le pilote soit astreint à un déplacement continuel du champ de vision, qui risque de lui faire perdre la notion exacte de l'orientation, malgré le compas et les repères que porte la partie mobile du périscope. La vision simultanée de l'horizon tout entier est réalisée dans le périscope à image annulaire (fig. 39). Au sommet du tube est une lentille annulaire R, limitée extérieurement par une surface sphérique et intérieurement par une surface ellipsoïdale argentée. Les rayons venus de tous les côtés sont réfractés ainsi, puis réfléchis vers la base du tube.

L'objectif O_2 réunit ces rayons dans le plan E_2. L'image panoramique formée de la sorte n'est vue dans son sens véritable que lorsqu'on l'observe, par l'oculaire O_3, à tra-



Fig 41. — Ce que l'on voit dans un périscope panoramique. Le tour d'horizon à la partie annulaire ; au centre, l'image agrandie d'une portion de l'horizon.

vers un prisme pentaèdre R_2. Cette image annulaire comprend tous les objets environnants, mais ils paraissent plus petits et plus éloignés qu'à l'œil nu. Afin d'apprécier exactement les dimensions et les distances, on a utilisé le cercle

qu'entoure l'image annulaire pour y projeter une image partielle amplifiée au moyen de la lentille divergente O_1 (fig. 38) et du réflecteur R_1. On aperçoit ainsi (fig. 41), au centre de l'image panoramique, une portion de l'espace (25°) à une plus grande échelle. En faisant tourner le périscope central, l'observation détaillée s'exerce successivement dans toutes les directions.

L'OPTIQUE ET LA DÉTERMINATION DES DISTANCES

Dans tous les appareils optiques que nous venons de décrire, le seul but atteint est la vision nette du paysage ou l'examen plus commode de lointains invisibles à l'œil nu. Mais le résultat est « qualitatif », c'est-à dire que l'on a bien reconnu l'existence dans le champ de l'instrument, jumelle, périscope ou appareil photographique, d'un objet déterminé. Si en général, dans la pratique de la vie, l'indication est suffisante, il n'en est plus de même en temps de guerre et il faut pousser plus loin l'examen, de « qualitatif » le rendre « quantitatif », non seulement découvrir une batterie ennemie ou un ouvrage fortifié, mais encore déterminer exactement la distance à laquelle il se trouve de l'observateur, de façon à pouvoir placer l'objectif sur la carte et diriger un feu d'artillerie sur lui avec précision.

Ce problème de la détermination des distances en art militaire a une importance considérable, et les conditions matérielles dans lesquelles il se pose ont conduit à créer toute une technique particulière utilisant des appareils spéciaux, bien différente du mode opératoire suivi, par exemple, dans le lever des plans, ou l'établissement normal des cartes géographiques. Il faut, en effet, avoir des appareils peu encombrants, robustes, s'installant instantanément et ne né-

cessitant pas de réglage préalable. Il faut, de plus, que leur maniement soit simple et qu'ils fournissent immédiatement, avec le maximum de précision pour le minimum d'opérations mathématiques ou graphiques, la distance exacte des divers objets examinés.

Les télémètres de campagne ou de marine sont les plus connus de ces appareils, et ils fournissent immédiatement la mesure des distances. Les appareils photographiques qui permettent de « restituer » entièrement, grâce à la métrophotographie, la topographie du terrain, ont un autre but, qui fut tout aussi important dans la guerre où, les fronts étant fixes, c'est à un siège gigantesque que l'on procéda. Nous allons d'abord décrire les télémètres.

Les télémètres.

Les télémètres sont des appareils destinés à mesurer les distances avec un seul opérateur, au moyen d'observations faites en une même station.

Nous examinerons d'abord le fonctionnement du plus connu des télémètres, le télémètre Barr et Stroud, d'origine anglaise.

Télémètre Barr et Stroud. — Les rayons lumineux émis par un objet B (fig. 42) pénètrent dans l'instrument par deux fenêtres F_1, F_2 et traversent deux prismes E_1 E_2, où ils subissent une double réflexion qui a pour effet de les renvoyer dans des directions perpendiculaires à leurs directions primitives. On peut d'ailleurs remplacer ces prismes par des miroirs métalliques.

Les deux faisceaux lumineux sont ensuite *repris* par des objectifs O_1, O_2, puis réfléchis à nouveau par un système de prismes centraux C_1, de façon à former deux images a_1, a_2 de l'objet, que l'on observe à l'aide d'un oculaire L_1.

Lorsque l'objet B est à une distance très grande, les deux

rayons incidents BE_1 et BE_2 peuvent être considérés comme parallèles ; le réglage est fait de telle sorte que les deux images a_1 et a_2 soient alors en coïncidence.

Lorsque l'objet B est à une distance finie, les deux rayons BE_1 et BE_2 forment un certain angle qui dépend de la distance de l'objet ; les deux images a_1 et a_2 ne coïncident pas et leur écartement est d'autant plus grand que la distance de l'objet est plus petite. La mesure de la distance est effectuée

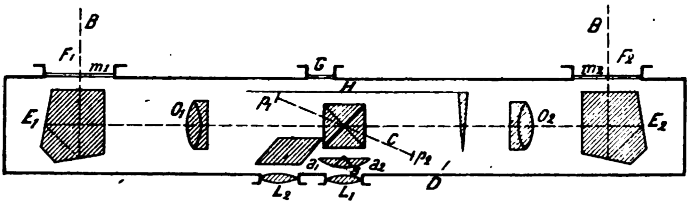


Fig. 42. — Disposition optique du télémètre Barr et Stroud.

en rétablissant la coïncidence au moyen d'un prisme déviateur D.

Le prisme, placé en arrière de l'objectif O_2, peut recevoir à cet effet un mouvement de translation suivant l'axe de l'instrument, en entraînant avec lui une échelle qui se déplace devant un index. La translation du prisme permet de déplacer l'image a_2 et de noter sur l'échelle la position pour laquelle les deux images coïncident. L'échelle peut être observée, soit directement à travers une fenêtre G, soit par réflexion dans un prisme en regardant dans l'oculaire de lecture L_2.

Les prismes centraux ne réfléchissent qu'une partie des images données par les objectifs, le paysage vu dans l'oculaire paraît divisé en deux champs séparés par une ligne très fine, dite ligne de séparation ; l'une des images est fournie par l'objectif gauche, l'autre par l'objectif droit. Lorsque la ligne de séparation coupe l'image, l'opérateur aperçoit

l'objet comme le montre la figure 43, l'écartement des deux images dépendant de la distance de l'objet. En agissant sur la vis de commande du prisme déviateur, on amène les deux images en correspondance, de façon qu'elles se présentent comme l'indique la figure. On lit alors la distance sur la règle graduée.

Différentes solutions peuvent être données au problème

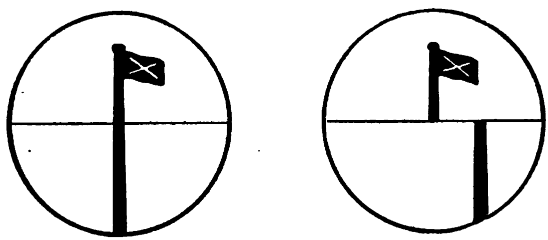


Fig. 43. — A gauche : comment on doit voir l'image quand on lit la distance sur le télémètre. — A droite : l'image avant le réglage.

du raccordement des objets visés, que montre la figure 44.

La ligne de séparation est fournie par l'arête d'un prisme séparateur fixé sur la monture des prismes centraux.

Indépendamment de ces organes essentiels, les télémètres comportent :

1° Deux verres m_1, m_2 placés dans les fenêtres, devant les prismes d'extrémité ; le verre m_1 est un prisme de très petit angle, le verre m_2 est une lame à faces parallèles.

Leur usage est de permettre d'assurer le raccordement des images quand la distance donnée par l'échelle correspond à la distance exacte de l'objet : c'est le réglage horizontal.

2° Un astigmateur composé de deux verres cylindriques p_1, p_2, qu'un levier permet d'interposer dans le trajet des rayons lumineux. Cet astigmateur allonge les images dans le sens vertical et permet ainsi de mesurer les distances d'objets

de faible hauteur ou les points lumineux pendant la nuit.

Les télémètres employés dans l'armée de terre ont en général 80 centimètres de base, c'est-à-dire de distance entre les deux fenêtres F_1 et F_2, et permettent de connaître les distances avec une limite d'erreur de 20 mètres à 2 000 mètres et de 150 mètres à 6 000 mètres, ce qui est très suffisant pour le tir ordinaire des mitrailleuses ou des canons de campagne. Ajoutons que l'erreur pour un instrument d'un type donné est proportionnelle au carré de la distance à l'objet repéré et inversement proportionnelle à la longueur de la base.

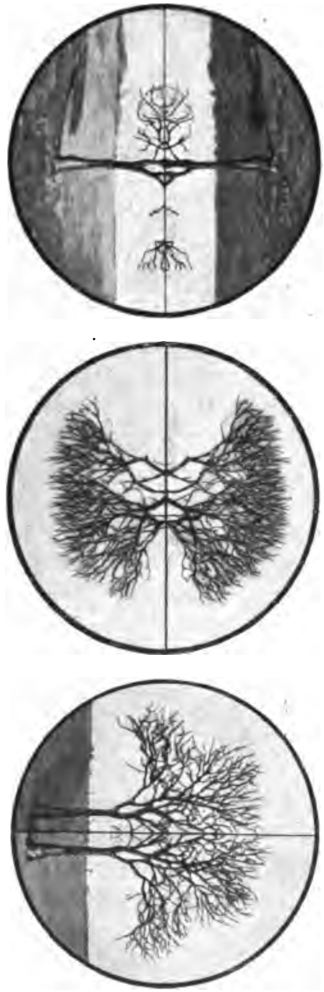


Fig. 44. — Les divers systèmes de coïncidence des images dans les télémètres. — *a*. Système à image supérieure renversée. — *b*. Système à image inférieure renversée. — *c*. Système à image retournée ou images côte à côte.

Télémètres marins. — En marine, le combat a lieu à des distances très supérieures, allant jusqu'à 15 000 mètres et plus. Il faut donc employer des télémètres plus puissants, dont les bases soient beaucoup plus grandes, de façon à avoir plus de précision.

La marine emploie actuellement des télémètres ayant 2 mètres de longueur mesurée de centre à centre des miroirs extrêmes, lesquels sont métalliques.

Il existe encore un modèle de $2^m,74$. On en construit même de $3^m,60$ et de $4^m,57$. On peut compter que l'erreur sur la



Fig. 45. — Télémètre type de $2^m,74$ de base sur monture navale.

distance ne dépasse pas 2 p. 100, soit 200 mètres pour 10 000 mètres, distance normale de l'ouverture du feu.

En dépit des précautions prises dans la construction des télémètres pour réduire les effets de la température qui provoquent l'allongement et surtout la courbure de la base, et, par suite, dérèglent l'appareil, ces effets subsistent toujours dans une certaine mesure. On arrive à en tenir compte par l'observation et on corrige les distances lues sur l'échelle.

D'ailleurs, pour amener au minimum les chances d'erreurs possibles provenant de cette cause et d'autres, on ne se contente pas, pour l'appréciation de la distance de l'ennemi, d'une mesure fournie par un seul télémètre. On en effectue

plusieurs simultanément sur des instruments différents et l'on établit la moyenne.

Dans la marine anglaise, on se sert de batteries de plusieurs télémètres, conjugués de telle sorte que la manœuvre d'un seul entraîne celle des autres et qu'une lecture unique donne la distance moyenne désirée (fig. 46).

Le Barr et Stroud est certainement un instrument excel-

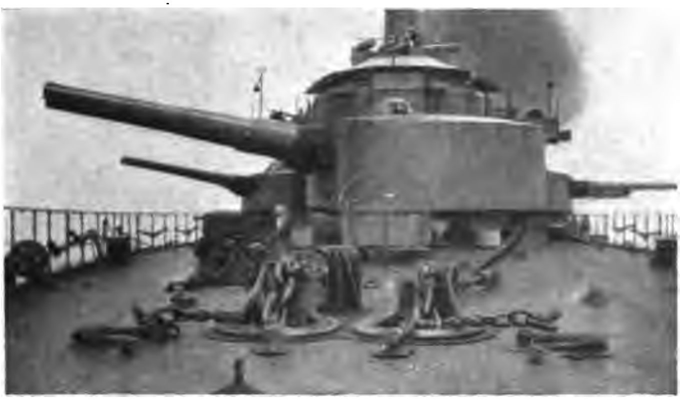


Fig. 46. — Tourelle de cuirassé et télémètres.

lent, mais la marche du progrès est continue et l'on a parlé d'un nouveau télémètre à deux postes dans lequel la base employée serait, non plus 1^{m},50 ou 2 mètres, mais bien la longueur totale du navire lui-même, à bord duquel sera faite l'observation, c'est-à-dire, avec les cuirassés modernes, environ 180 mètres. La précision serait alors supérieure, si la simultanéité des observations aux deux postes extrêmes était absolue.

Le télémètre stéréoscopique. — Signalons enfin un télémètre dont le principe est différent de celui des appareils précédemment décrits.

Il repose sur l'effet stéréoscopique que donne la vision

binoculaire lorsque l'écartement des objectifs est grand, comme c'est le cas dans les télémètres.

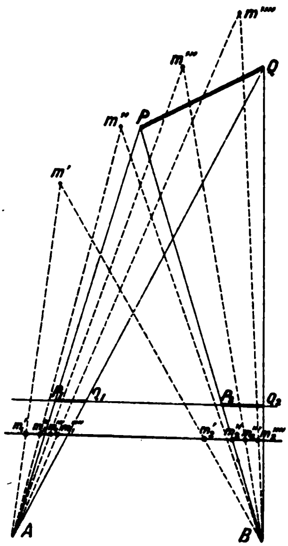


Fig. 47. — Principe du fonctionnement du télémètre stéréoscopique.

Supposons (fig. 47) qu'une série de repères alignés, *m'*, *m''*, *m'''*, *m''''*, etc., soit disposée dans l'espace suivant une droite, tel un vol d'oiseaux s'enfuyant vers l'horizon, nous aurons, dans le plan focal des oculaires, deux séries d'images que nous pouvons repérer. Ceci étant fait, en regardant dans l'appareil, l'effet stéréoscopique se produira et les repères sembleront situés dans l'espace à des plans différents. Si à cette sorte d'échelle se juxtapose l'image d'un paysage comme celui représenté figure 49, un objet PQ semblera compris entre deux



Fig. 48. — Ce que l'on voit dans un télémètre stéréoscopique

divisions numérotées qui permettront ainsi d'apprécier son

éloignement avec d'autant plus d'exactitude que la graduation de l'échelle sera plus serrée.

Télémètre Ponthus et Thérode. — Le principe de cet appareil est le même que celui de l'ancien héliomètre de Bonguer qui date du XVIIe siècle.

L'objectif d'une lunette est coupé en deux suivant un plan contenant l'axe optique. Lorsque ces deux demi-lentilles

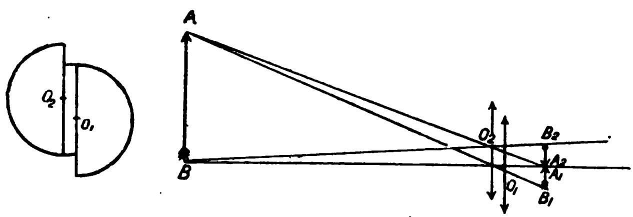


Fig. 49. — Principe du télémètre Ponthus et Thérode.

sont décalées l'une par rapport à l'autre, on obtient deux images d'un même objet, comme le montre la figure 49.

En déplaçant, à l'aide d'une vis micrométrique, la lentille O_2, le point A_2 peut être amené au contact de B_1. On connaît alors O_1O_2 très sensiblement égal à A_1B_1.

La distance d du but est alors donnée par la formule

$$d = \frac{lf}{a},$$

l étant la hauteur du but évaluée précédemment, f la distance focale de l'objectif et a la distance A_1B_1 mesurée par le micromètre.

En pratique, la vis entraîne un tambour portant des courbes graduées selon les distances de l'objet observé. Le tambour se déplace en regard d'un index mobile sur une échelle graduée en longueur des bases.

L'index étant mis en regard du nombre mesurant la hauteur supposée du but, quand le contact des deux images est réalisé on lit directement la distance.

Jumelle-télémètre Souchiez. — On mesure la distance en évaluant la longueur du but qui sous-tend dans l'appareil un angle donné α.

Un biprisme placé devant chaque oculaire donne une

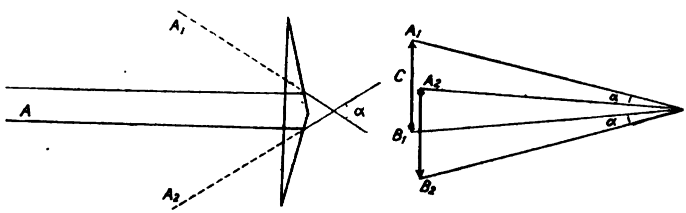


Fig. 50. — Principe de la jumelle-télémètre Souchiez.

image dédoublée. Ces deux images en général se recouvrent partiellement (fig. 50).

Si l'on considère un point A du but, les deux images A_1A_2 qu'il fournit sont vues sous un angle constant a (double de la déviation correspondant à chacun des prismes).

Le but entier AB donnera deux images A_1B_1, A_2B_2, les images d'un point quelconque étant vues sous l'angle a. Si on connaît la hauteur l du but du sommet A (la tête si on observe un fantassin) au point C du corps dont l'image supérieure C_1 se projette sur l'image inférieure A_2, on aura, par application de la même formule que dans le cas du télémètre Ponthus et Thérode, la distance cherchée.

Tout calcul est du reste évité, dans l'appareil réglementaire de l'armée, par l'inscription, sous les recouvrements de la jumelle, des images d'un fantassin et d'un cavalier sectionnées en parties égales, avec, en regard de chaque trait, la distance du but pour laquelle le sommet de la tête de l'image supérieure

se projette sur le point de l'image inférieure correspondant à ce trait.

Télémètre Souchiez. — Dans l'infanterie, outre le télémètre Barr et Stroud qui est un instrument de précision,

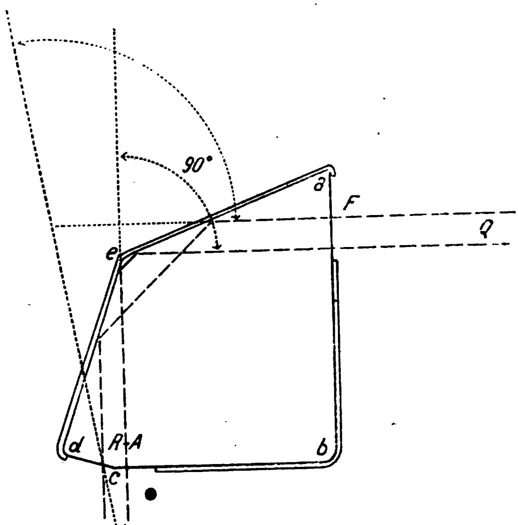


Fig. 51. — Principe du télémètre d'infanterie Souchiez.

on utilise, pour les déterminations de distances usuelles, un appareil plus simple : le prisme télémètre Souchiez.

Il est constitué par un prisme pentagonal en verre enfermé dans une monture de celluloïd percée de deux fenêtres F et R-A (fig. 51).

La fenêtre F étant tournée du côté d'un objet lumineux O, les rayons qui arrivent sur la face *ab* prennent, après deux réflexions sur les faces *ae* et *ed*, une direction perpendiculaire à celle de leur incidence, et sortent de la face *bc* et de la face *ed*, en faisant entre eux un angle de 1°10′ environ.

Devant la fenêtre à double facette (R-A) est disposé un curseur mobile C formant écran, que l'observateur peut placer devant l'une ou l'autre facette. Suivant qu'il regarde par la demi-fenêtre A ou la demi-fenêtre R, il voit l'objet O dans une direction faisant avec le rayon incident un angle de 90° ou un angle de 90° + 1°10′.

En regardant l'objet d'abord à travers une des fenêtres, puis, après s'être déplacé d'une certaine distance, à travers l'autre fenêtre, l'observateur détermine sur le terrain la base AB d'un triangle dont le point O est l'autre sommet

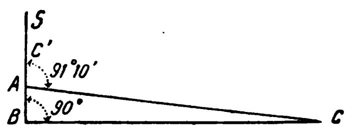


Fig. 52. — Le télémétrage réalisé par l'appareil Souchiez.

et dont les angles à la base sont 90 et 91°,10 (fig. 52). En mesurant la distance AB d'une façon quelconque, puis en lisant la table annexée à l'instrument, on a la distance cherchée.

Télémètre Davé pour l'artillerie de côte. — Dans l'artillerie de côte, le problème de la détermination de la distance se trouve simplifié par le fait que, le but sur lequel on tire étant situé à un niveau constant, il suffit, puisque l'on connaît la hauteur de la batterie au-dessus du niveau de la mer, de déterminer ce que l'on appelle l'angle de dépression ***d*** (fig. 53).

Somme toute, on fait de la télémétrie verticale : la base de l'appareil est la hauteur H au-dessus des flots, et comme on connaît l'indication que fournirait la station qui se trouverait à leur niveau, on la supprime. Le télémètre se simplifie donc et se réduit à un appareil permettant de me-

surer *d* et comprenant une lunette de visée tournant autour d'un axe horizontal (fig. 53) et entraînant dans son déplacement un abaque sur lequel sont tracées des courbes graduées en distances. L'abaque donne la distance, par la lecture du chiffre venant se placer au centre de la croisée

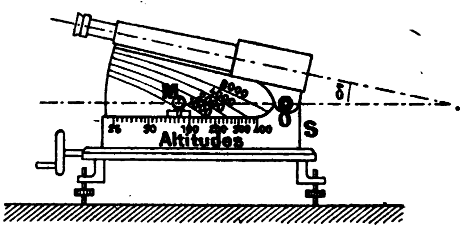


Fig. 53. — Principe du télémètre Davé.

des fils du réticule d'un viseur M solidaire de la semelle de l'appareil et amené en face du trait de la graduation correspondant à l'altitude H de la batterie. C'est le principe du télémètre Davé.

Télémètre Deport. — On remarque d'autre part que, si on connaît la distance du but D et la dépression *d*, l'angle de tir *t* est connu, puisqu'il est une fonction connue de ces deux variables. On conçoit donc qu'il soit possible, pour une altitude H donnée, de déterminer immédiatement l'angle de tir, qui est $t + d$, par la seule connaissance de la dépression *i*. C'est ce qui est réalisé dans le télémètre Deport.

Correction des mesures du télémètre. — Les tirs à la mer nécessitent des réglages importants, en raison de la mobilité des objectifs. La distance *mesurée* donnée par le télémètre n'est pas la distance du but au moment de la chute du projectile qui a un temps de trajet de 45 à 50 secondes pour les distances supérieures à 15 000 mètres.

La correction à apporter dépend non seulement de cette

durée, mais encore de la vitesse du but et de sa direction. Elle est proportionnelle à la distance, toutes choses égales d'ailleurs, et on l'évalue en centièmes de cette distance. Des correcteurs spéciaux placés sur les appareils, ou des réglettes analogues aux règles à calcul, permettent d'en tenir compte.

Dans le tir sur objectifs aériens, on rencontre les mêmes difficultés de réglage que dans le tir de côte, mais bien plus accentuées, car ici le but se déplace dans trois directions et non plus dans un plan horizontal, et sa vitesse, voisine de 30 mètres à la seconde, est de beaucoup supérieure à celle des bateaux. Enfin la facilité d'évolution des aéronefs complique encore le problème.

Les solutions proposées depuis la guerre — car avant, le rôle de l'aviation étant insoupçonné, personne ne s'était occupé de la question — sont très nombreuses. Nous n'entrerons dans aucun détail les concernant, pour des raisons faciles à comprendre, et nous nous bornerons à en indiquer le principe physique général.

Observation latérale. — On utilise la méthode de l'observation latérale. A cet effet, deux postes O, O′, situés à une distance L de plusieurs kilomètres, visent simultanément le but aérien B. Le poste éloigné O′ téléphone à intervalles convenus sa direction de visée au poste O voisin de la batterie qui, grâce à un appareil automatique, fait immédiatement la triangulation, d'où la distance horizontale du but (fig. 54). Un

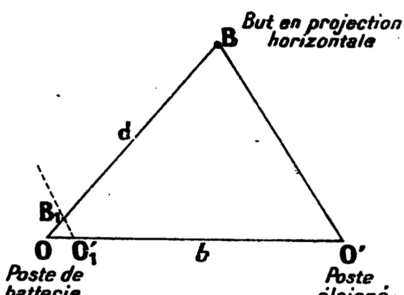


Fig. 54. — Principe de repérage du tir contre objectifs aériens.

télémètre d'altitude spécial donne, d'autre part, l'angle de site. Comme, d'un autre côté, l'angle de tir dépend non seulement de la distance, mais encore de l'angle de site, une planchette-abaque de hausse permet de combiner automatiquement ces deux données. Enfin, dans la pratique, ce n'est pas sur la distance télémétrée à l'instant du tir que celui-ci est commandé, mais sur une distance qui sera atteinte par le but quelques secondes après les opérations de télémétrage.

Des canons antiavions ont été construits depuis le début de la guerre. On a d'autre part adapté au nouveau mode de tir le matériel de 75 disposé sur affûts permettant le tir sous les grands angles. Enfin un matériel spécial pour le tir très rapide qu'il est nécessaire de réaliser de nuit particulièrement a été établi.

LA PHOTOGRAPHIE A LA GUERRE

Voir est bien, mais l'image s'efface et ne laisse plus qu'une impression personnelle fugitive. Aussi la photographie aura-t-elle joué dans la guerre un rôle fondamental en fournissant des documents qui, ainsi que nous le verrons, permettent de tracer la carte rigoureusement exacte des organisations de l'ennemi.

Photographie terrestre. — Dans les tranchées, où l'on est près de l'ennemi et où l'observation permanente est parfois difficile, on a souvent fait appel à la photographie. Les appareils employés sont de type ordinaire et seul leur dispositif de prise de vue mérite d'être signalé. Pour avoir une photographie riche en renseignements, il faut la prendre d'un point de vue élevé, et il existe des appareils spéciaux, trop peu répandus malheureusement, qui permettent d'élever instantanément l'appareil photographique à 5 ou 6 mètres au-dessus du niveau de la tranchée. Les clichés ainsi obtenus donnent du terrain situé en avant de l'appareil une vue plongeante mettant en évidence tous les détails cachés aux observateurs placés au niveau du sol.

Photographie aérienne. — C'est particulièrement aux avions et aux ballons captifs qu'est réservée la mission de photographier l'ensemble du terrain occupé par l'ennemi, de façon à y repérer les lignes de défense. On emploie à cet effet, dans l'aviation française, des appareils photographiques à très grande distance focale. On obtient ainsi des clichés qui, même pris de grandes altitudes, révèlent avec une précision extraordinaire les détails du sol. C'est ainsi, pour ne

citer qu'un exemple, que le fameux canon qui bombardait Dunkerque fut photographié par un de nos aviateurs avec une telle perfection que l'on distinguait sur l'épreuve jusqu'aux soupiraux du souterrain qui permettait d'amener les munitions.

Le problème de la photographie aérienne a fait depuis la guerre de très grands progrès dans toutes les armées belligérantes.

La dimension des photographies et des appareils a été sans cesse en croissant. On a en service des appareils de $1^{m},20$ de distance focale, dont la lentille est large d'une douzaine de centimètres et qui permettent de prendre des photographies 24×30. La cinématographie, soit très rapide, soit à une allure dépendant de la vitesse de l'avion, de telle sorte que les vues se raccordent bout à bout sans recouvrement notable, a aussi été mise au point.

Les dispositifs accessoires sont seuls à signaler : installations électriques réchauffant les plaques (de façon à les empêcher de se refroidir et par suite de devenir moins sensibles), et l'appareil (pour éviter la condensation de l'humidité sur le système optique) ; mode de suspension élastique éliminant aussi parfaitement que possible les vibrations de l'avion ; index donnant sur la plaque la direction du nord et l'inclinaison de l'appareil ; systèmes d'écrans colorés améliorant la netteté des vues prises et permettant de déceler les détails camouflés pour la vision directe, etc.

Photographie avec écrans colorés. — Nous venons de dire que les appareils étaient munis d'un écran coloré pour améliorer la photographie.

C'est qu'en effet l'emploi de radiations plus ou moins sélectionnées dans le spectre permet d'obtenir des résultats dont l'intérêt est fort particulier dans l'art militaire, où bien souvent le brouillard, même léger, ou la lumi-

nosité propre du ciel suffisent pour masquer des détails lointains dont l'importance est fondamentale.

C'est le professeur Wood qui le premier a systématiquement utilisé ce mode d'éclairage.

On sait aussi que les apparences des objets varient considérablement lorsqu'ils sont examinés à une lumière ou à une autre. Les couleurs des étoffes ne sont pas les mêmes au jour



Fig. 55. — La Sierra Candelaria vue de San José de Costa-Rica. (Photo faite sur une plaque ordinaire.)

solaire ou à la lumière de l'arc électrique ; la lumière sodée donne aux physionomies une teinte verdâtre cadavérique ; à la lumière de la lampe à vapeur de mercure, les couleurs rouges semblent noires, etc., et ces variations de coloration, choquant l'œil qui n'y est pas habitué, limitent l'emploi des modes d'éclairage basés sur la luminescence des vapeurs.

Pratiquement, toutes les sources lumineuses émettent plus ou moins de radiations ultra-violettes.

Si l'on photographie un objet émettant des radiations visibles en même temps que des radiations invisibles,

pour filtrer ces dernières on peut employer divers dispositifs.

Photographie en lumière invisible. — Pour ne conserver que les grandes ondes de l'infra-rouge, on utilisera avec succès un verre bleu au cobalt et une cuve contenant une solution de bichromate de potassium. Les longueurs d'onde des radiations qui traversent ces écrans sont comprises



Fig. 56. — Même photo sur plaque orthochromatique et avec un écran jaune.

entre 6 900 et 7 500 unités angström (dix-millionième de millimètre) et, bien que sensibles à l'œil, elles ne jouent dans la vision aucun rôle; aussi peut-on considérer que les photographies obtenues avec elles sont des photographies infra-rouges.

Or la lumière infra-rouge est très peu diffusée par l'atmosphère. Si nos yeux étaient sensibles à cette lumière et incapables de percevoir la lumière visible, les montagnes lointaines cesseraient de nous apparaître enveloppées du voile bleuâtre qui en cache les détails. Les prairies vertes se détacheraient des roches grises aussi nettement que si

quelques centaines de mètres seulement nous séparaient des objets observés, leur dimension apparente seule étant modifiée. La lumière infra-rouge, malheureusement invisible pour nous, n'est pas non plus perçue par les plaques photographiques ordinaires, mais l'est suffisamment par une plaque préparée *ad hoc* pour qu'une bonne image résulte de son action prolongée.

On remarque immédiatement sur l'épreuve photogra



Fig. 57. — Même photo faite en lumière infra-rouge. (*Remarquer la netteté des lointains.*)

phique que, tandis que les premiers plans sont plutôt moins détaillés dans la photographie faite en lumière infra-rouge que dans les deux autres, la netteté, qui diminue rapidement avec la distance dans la photographie ordinaire et à peine moins rapidement dans la photographie orthochromatique, demeure au contraire presque la même à tous les plans dans la photographie faite en lumière infra-rouge.

La téléphotographie. — D'une manière générale, la photographie documentaire de reconnaissance s'effectue à l'aide de deux appareils photographiques : un appareil

téléphotographique fournissant des images très agrandies des objets éloignés et n'embrassant par conséquent qu'un espace très limité de terrain, et un appareil auxiliaire à grand champ donnant une vue d'ensemble sur laquelle se trouveront les repères.

L'échelle de reproduction, en téléphotographie, est proportionnelle à la longueur focale de l'objectif employé. On est donc conduit, pour obtenir des images de dimensions convenables, à utiliser des objectifs de très grande distance focale. Trois procédés permettent d'arriver à ce résultat.

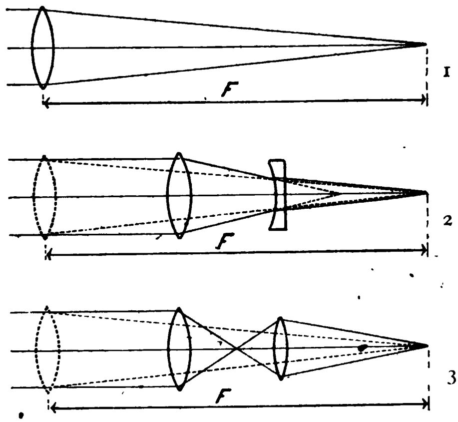


Fig. 58.

1. Objectif unique à grande distance focale.
2. Téléobjectif divergent (ou négatif) donnant la même distance focale F que 1.
3. Téléobjectif convergent (ou positif) équivalent au précédent.

On peut utiliser un système optique unique à long foyer, ou au contraire utiliser des systèmes optiques doubles de deux sortes, suivant que le premier élément convergent donne une image réelle interceptée par un deuxième élément divergent dans un cas (téléobjectifs divergents) ou par une lentille convergente qui la projette en l'agrandissant (téléobjectif convergent) (fig. 58).

Les objectifs à long foyer qui donnent des images très éclairées et sans distorsion ont l'inconvénient de nécessiter un très grand tirage de la chambre; aussi ne peuvent-ils être

employés que dans certains cas spéciaux, comme les photographies d'avions où une distance focale réelle de 1m,20 est à l'heure actuelle courante.

Les téléobjectifs sont moins coûteux et n'exigent que des chambres de dimensions réduites, mais ils donnent des images peu éclairées et la correction des erreurs de la première lentille doit être très bien faite, car ses défauts sont amplifiés par la deuxième. Le type divergent est le plus lumineux et le moins encombrant.

La distance focale F d'un téléobjectif est donnée par la formule :

$$F = \frac{f_1 f_2}{d},$$

f_1 et f_2 étant les distances focales des deux lentilles et d l'écartement de leurs foyers respectifs ou l'intervalle optique.

Par exemple, avec un objectif où $f_1 = 120$ millimètres, $f_2 = 60$ millimètres et $d = 10$ millimètres, on a $F = 720$ millimètres.

Le tirage de la chambre (distance de l'image à la lentille négative) est seulement de 30 centimètres (1). C'est-à-dire que le résultat est le même que si on avait opéré avec une lentille de 720 millimètres de distance focale nécessitant un tirage plus que double de celui employé.

APPAREILS DE POINTAGE

Avec les armes à feu modernes portant à grande distance, avec les canons et les obusiers tirant à plusieurs kilomètres, il a fallu perfectionner les organes de visée et les méthodes de tir.

(1) On le calcule par la formule $T = A\ (A - 1)\ F$ où $A = \frac{F}{f_1}$.

Lunettes viseuses de fusil. — Dans le procédé ordinaire de visée, dans lequel on cherche à réaliser l'alignement du

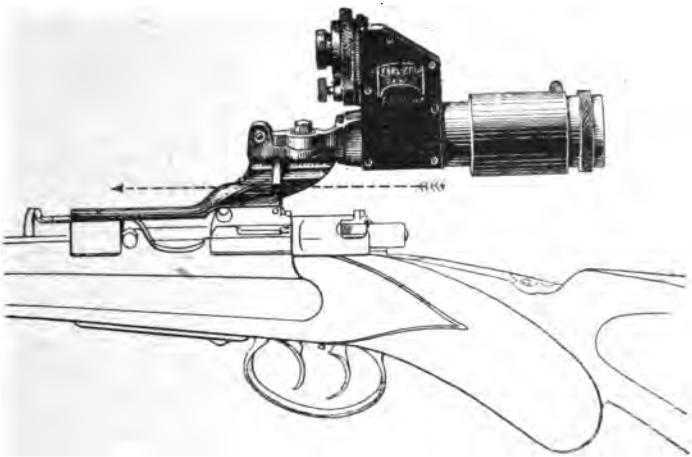


Fig. 59. — Une lunette viseuse à prisme pour fusil.

cran de mire, du guidon et du but, l'œil, qui est incapable de voir nettement et simultanément des objets situés à des

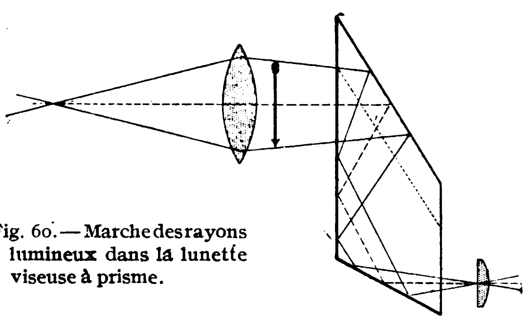


Fig. 60. — Marche des rayons lumineux dans la lunette viseuse à prisme.

distances différentes, est obligé d'accommoder tour à tour pour ces trois distances, ce qui est fatigant. Aussi les armuriers ont-ils été conduits à adapter aux fusils des lunettes

qui assurent une extrême précision du tir, tout en évitant la fatigue de la vue. La visée s'effectue simplement en regardant un réticule disposé au foyer de l'objectif et au point de croisée duquel on cherche à amener l'image du but.

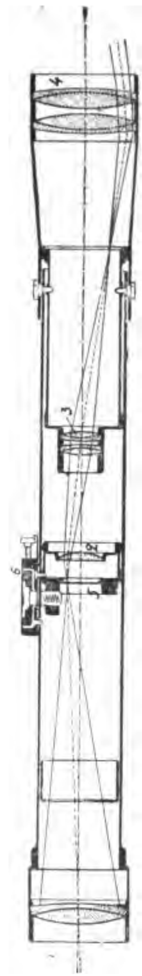


Fig. 61. — Coupe du viseur lunette terrestre.

Mais le problème n'est pas si simple à résoudre en pratique qu'il en a l'air *a priori*.

La lunette de Galilée, le plus simple et le plus court des instruments d'approche, ne convient pas, à cause de l'impossibilité de la munir d'un réticule, puisque l'image finale est virtuelle.

La lunette astronomique ordinaire ne convient pas davantage. Elle donne bien une image réelle de l'objet, mais cette image est renversée. Si cela n'a pas d'inconvénient dans l'étude des astres, il n'en est pas de même dans le cas actuel où, pour reconnaître et viser sans hésitation un but en mouvement, il est nécessaire de le voir et de suivre ses mouvements dans leur vrai sens. Le redressement peut s'opérer, comme dans les longues-vues, par interposition d'une lentille convergente entre l'objectif et l'oculaire. Une autre lentille (2, fig. 61), appelée lentille collective, augmente le grossissement et le champ.

Pour redresser l'image, et éviter en même temps l'accroissement de poids et de dimension auquel conduit le système précédent, on utilise, surtout dans l'armée allemande, des prismes redresseurs analogues à ceux des jumelles à prismes.

Les figures 59 et 60 montrent la marche des rayons lumi-

neux dans une telle lunette et le mode de fixation sur le fusil Mauser. L'amplitude du champ est de 13°,5 et la clarté telle qu'il est possible de viser à coup sûr, même quand le crépuscule est presque sombre. L'oculaire se règle suivant la vue du tireur et peut être immobilisé pour éviter les dérangements sous l'action des chocs du recul. Une bague moletée

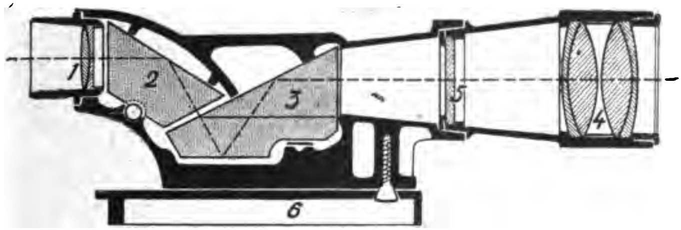


Fig. 62. — Coupe d'une lunette à prismes redresseurs.

qui entoure l'objectif sert à régler le réticule. Enfin une bonnette en caoutchouc s'adapte à la lunette lorsque la visée est gênée par la lumière ambiante.

Chose essentielle, et qui crée toutes les difficultés : il faut que l'œil du tireur soit à 5 ou 6 mètres en arrière de la lunette, ce qui conduit à placer l'anneau oculaire en cet endroit.

Lunette panoramique. — Pour le tir des canons, les appareils de visée sont plus compliqués et plus parfaits. Sans entrer dans la description complète de tous les appareils (collimateurs, lunettes de batterie, etc.) employés par l'artillerie, nous décrirons seulement avec quelques détails la lunette panoramique qui, avant la guerre, même pour l'équipement des canons français, venait d'Allemagne, et que l'industrie française fournit maintenant à la satisfaction de tous.

Le but que remplit cet appareil est le suivant :

Il arrive souvent que l'objectif du tir est difficilement

visible, ou même complètement masqué par un obstacle. Le vent, de plus, fait dévier le projectile, de telle sorte qu'il est nécessaire de pointer dans une direction qui s'écarte plus ou moins de celle du but. On est donc conduit à viser, non plus le but lui-même, mais un objet différent, plus rapproché, dont la direction fait avec celle du but un angle préalablement déterminé. La lunette de visée doit donc être susceptible de se mouvoir indépendamment du canon, à la condition que l'angle formé entre la direction de l'axe optique et celle de la bouche à feu soit très exactement connu.

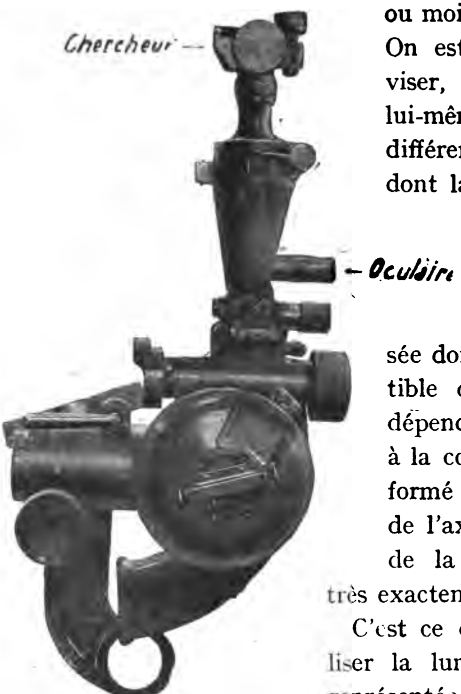


Fig. 63. — Lunette panoramique française.

C'est ce que permet de réaliser la lunette panoramique, représentée figures 63, 64, et dont la figure 65 permet de comprendre le fonctionnement.

Un prisme à réflexion totale P_1 donne d'un objet éloigné OO' une image symétrique $O_1O'_1$ par rapport à sa face hypoténuse. Les rayons lumineux rencontrent alors un prisme P_2 de Wollaston qui transforme l'image $O_1O'_1$ en une image symétrique $O_2O'_2$. La lentille L_1 donne ensuite une image $O_3O'_3$ réelle et renversée par rapport à $O_2O'_2$, mais cette image ne se forme pas, car le prisme P_3 intercepte les rayons

lumineux et remplace cette image par une autre $O_4O'_4$ symétrique par rapport à son arête et qui est du même sens que OO′, l'objet. C'est cette image $O_4O'_4$ que l'on examine à l'aide de la lentille L_2 qui fonctionne comme une



Fig 64. — Lunette panoramique allemande.

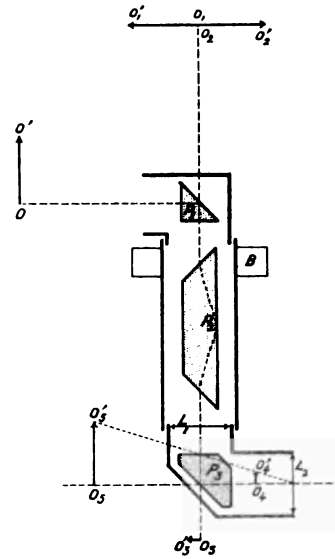


Fig. 65. — Marche des rayons dans une lunette panoramique.

loupe et en donne une image virtuelle $O_5O'_5$ agrandie et de même sens que l'objet.

Les prismes P_1 et P_2 sont montés dans des tubes coaxiaux pouvant tourner l'un par rapport à l'autre. Un engrenage contenu dans une boîte B assure pour le prisme P_1 une rotation double de celle du prisme P_2. Grâce à cette disposition, lorsque P_1 tourne autour de l'axe du tube qui le contient pour examiner l'horizon, l'image finale dans l'oculaire fixe reste droite, comme on peut s'en rendre compte par un raisonnement d'optique élémentaire.

En vue de l'emploi de la lunette panoramique comme goniomètre, des graduations convenables permettent de déterminer en millièmes (1) l'angle dont on a fait tourner le prisme P_1, c'est-à-dire l'angle que fait la direction de l'objet visé avec l'axe optique de l'oculaire.

L'axe autour duquel s'opère la rotation doit être rigoureusement vertical. Or, sur le terrain, les roues et la bêche de crosse se trouvent rarement placées sur un plan horizontal. C'est pourquoi l'appareil de visée est monté, à gauche de la pièce, sur un support articulé relié au secteur de pointage. La lunette ne supporterait pas le recul ; elle est fixée sur le berceau.

LA MÉTROPHOTOGRAPHIE

Lorsque l'on est en possession d'une photographie, que cette photographie ait été prise d'un point de vue terrestre, colline ou belvédère, ou qu'elle ait été obtenue par un avion ou un ballon captif, le problème qui se pose est le suivant : « restituer » les dimensions des monuments ou construire les plans topographiques d'après les vues de ces monuments ou des paysages prises de stations convenablement choisies et en nombre suffisant. C'est le programme que résout la métrophotographie, que le colonel Laussedat en particulier a amenée à un haut degré de perfectionnement. Nous allons essayer d'exposer les méthodes généralement employées et nous commencerons par distinguer le problème « terrestre » du problème « aérien ».

Dans le problème terrestre, les vues sont prises horizontalement, ou tout au moins, dans le cas des ballons d'obser-

(1) Le millième, unité d'angle de l'artillerie, représente l'angle sous lequel on voit à 1 kilomètre un objet d'un mètre. Il équivaut à 3 minutes 26 secondes d'arc.



Fig. 66. — Photographies de Nancy prises à des stations distantes de 10 mètres. Distance des stations à la *cathédrale*, 2,5 kilomètres.

vation, sous une faible incidence et, dans tous les cas, c'est un paysage distant qu'il s'agit de reporter sur une carte. Au contraire, dans les vues prises d'avions ou de dirigeables, l'axe de l'appareil est franchement vertical et la vue prise est celle du terrain directement survolé.

Nous allons d'abord exposer les principes sur lesquels on se base pour faire la restitution. Trois ordres de documents peuvent être employés : des photographies uniques, des photographies prises soit à l'aide d'un stéréoscope, soit de deux stations dont on connaît la distance, enfin des photographies prises d'avion.

D'une manière générale, on peut considérer toute photographie comme une image perspective dont le point de vue serait le point nodal d'incidence de l'objectif, et la distance principale, la distance focale, dans le cas d'objets éloignés. Par suite, les propriétés perspectives des figures se conservent. En particulier, les faisceaux de droites parallèles concourent en leur point de fuite commune. Le problème se ramène donc à un problème de géométrie descriptive.

La ligne d'horizon. — Pour trouver la ligne d'horizon, on considérera deux séries de deux droites horizontales dans le même plan vertical (par exemple l'arête d'un mur et sa base), et on joindra leurs points de fuite. Pour trouver le point de vue S, on choisit deux droites horizontales qui dans l'espace sont rectangulaires, les arêtes d'un toit ou un coin de maison par exemple, et on fait un rabattement autour de la ligne d'horizon. Un lieu du point de vue sera la circonférence décrite sur la distance qui sépare les points de fuite de ces deux droites comme diamètre. Si on prend un second couple d'horizontales rectangulaires, on a un second lieu du point de vue ; l'intersection en fixe la position.

La distance de ce point à la ligne d'horizon donne la distance focale de l'objectif. On peut encore, si la photogra-

phie n'a pas été coupée, se borner à abaisser du centre de l'épreuve la perpendiculaire sur la ligne d'horizon. Cette droite coupe la première circonférence en S.

La restitution. — On a maintenant tous les éléments pour effectuer la restitution. Naturellement nous avons supposé dans ce qui précède que l'appareil avait son axe parfaitement horizontal, c'est-à-dire que les verticales restent parallèles et que leur point de fuite est ainsi rejeté à l'infini.

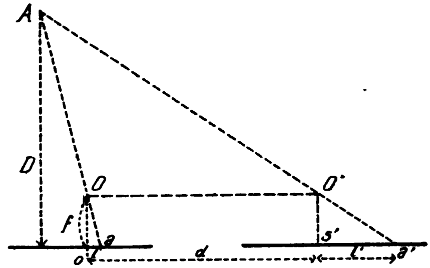


Fig. 67. — La restitution d'après des photographies prises à deux postes distants.

La restitution ainsi obtenue est à une échelle quelconque et, pour la fixer, il faut connaître une des cotes. Cela n'est pas toujours possible ; aussi cherche-t-on à lever la difficulté en opérant avec deux photographies stéréoscopiques ou, mieux, deux photographies prises parallèlement à deux stations distantes d'une certaine longueur connue exactement (fig. 67).

En effet, soit A un point de l'espace qui donne une image *a* à un poste et une image *a'* à l'autre poste situé à la distance *d* du premier : nous cherchons la distance D de l'objet à la plaque. On connaît les distances *l*, *l'* ; les propriétés des triangles semblables A*dd'*, A*oo'* donnent immédiatement :

$$\frac{D}{D-f} = \frac{d + l' - l}{d},$$

d'où l'on tire facilement la distance D cherchée.

Photographies aériennes. — Dans les photographies aériennes, on procède un peu autrement.

Les mesures prises sur chaque photographie sont rap-

portées à deux axes de coordonnées qui sont la ligne que donnerait, en coupant le cliché, le plan horizontal et le plan vertical passant par l'axe optique de l'appareil photographique. Il faut donc repérer sur chaque cliché le « point principal » (projection de l'axe optique de l'objectif sur le cliché) et la direction de l'horizon.

Le repérage du point principal s'obtient en disposant à l'arrière de la chambre, sur le cadre intérieur, des repères métalliques, dont l'image se reproduit en noir sur les clichés. La direction de l'horizon se détermine par le cadre-niveau Jardinet. C'est un tube plat en verre, rempli partiellement de mercure, et placé au contact de la plaque. Par l'image de ses ménisques de mercure, il fournit la direction des horizontales (fig. 68).

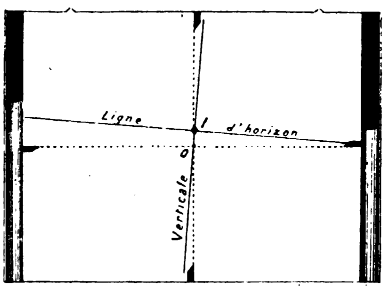


Fig. 68. — Cadre-niveau Jardinet.

Connaissant d'autre part la distance focale de l'objectif photographique employé, on est ramené à un problème très simple de géométrie descriptive.

Lorsqu'on a déterminé ainsi la direction de quelques points, il est facile, en les joignant deux à deux, de placer en position, sans nouvelle construction, des objectifs se trouvant sur les traits ainsi tracés.

Si la reconnaissance est faite à poste fixe, du haut d'un drachen par exemple, le canevas que l'on se propose d'établir doit s'appuyer sur des objectifs visibles à la fois de terre et du ballon ; ils serviront à régler le tir des batteries amies. Le problème de la restitution est très simple, puisque, par comparaison avec la carte, on a déjà des stations toutes repérées.

La méthode des points alignés. — Lorsqu'on emploie les ballons, libres ou dirigeables, ou les aéroplanes, pour relever une large zone, l'appareil étant dirigé vers le sol, il est nécessaire de commencer par orienter les clichés consécutifs. C'est une opération très facile si les clichés sont pris assez rapprochés. Soient, en effet, trois stations succes-

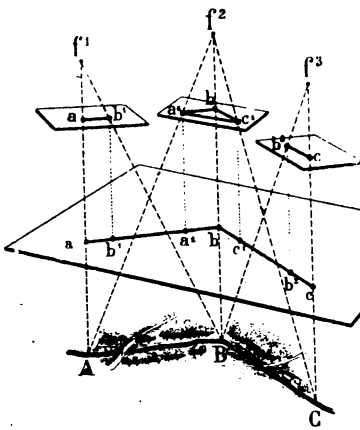


Fig. 69. — Le principe des points alignés pour la disposition relative des photographies aériennes.

sives, f_1, f_2, f_3 et a, b, c les images des points A, B, C à l'aplomb des stations. Supposons que nous ayons également sur f_1 l'image b_1 du point B; sur f_2 celle a_2 de A et c_1 de C; sur f_3 l'image b_2 du point B (fig. 69).

Si l'on projette sur le plan horizontal les points de vue f_1, f_2, f_3, et les images des points A, B, C, on obtient sept points formant deux lignes droites, la première contenant a_1, b_1, a_2, b et la seconde b, c_1, b_2, c.

Cette propriété des points alignés permet non seulement de placer les clichés les uns par rapport aux autres, mais



Fig. 70. — Une ville d'Allemagne. Vue prise en avion.



Fig. 71. — Le plan de la ville représentée sur la figure précédente.

encore de mesurer la distance entre les aplombs des deux stations d'observation.

Quant aux objectifs et aux appareils employés, la plus grande variété règne à leur sujet, chaque chef de service



Fig. 72. — Photographie aérienne « quelque part dans le Nord », montrant les éclatements d'obus entourant les tranchées nettement reconnaissables.

ayant ses préférences ; il semble pourtant que l'on prendra à l'avenir des objectifs français que l'on a été surpris de trouver excellents, tandis qu'auparavant on se refusait à accorder *a priori* une valeur quelconque à d'autres appareils photographiques que ceux des Allemands.

Nous n'avons rien dit du problème très délicat qui con-

siste à lever les cartes à l'aide de la photographie. Cette méthode, appliquée au Service géographique de l'armée, étendue au lever du plan des Alpes par M. Heilbronner, nécessite des appareils tout à fait spéciaux et une si grande précision que les méthodes changent complètement. Mais ce problème est tellement différent de celui que la guerre a posé, que nous n'avons pas cru devoir en parler.

La méthode des faisceaux. — De la prise par avion des photographies, il n'y a que peu de choses à dire. En effet, l'appareil lève automatiquement le terrain à une très grande échelle. Si, par exemple, étant donnés l'appareil et l'altitude, un kilomètre occupe 10 centimètres, on a fait un lever au 1/10 000. Il suffit de comparer la photographie à la carte d'état-major pour reporter immédiatement sur cette dernière les positions exactes de tous les objectifs militaires.

Parmi les méthodes couramment employées en aviation pour opérer la restitution, nous signalerons la méthode des faisceaux, dont le principe est le suivant :

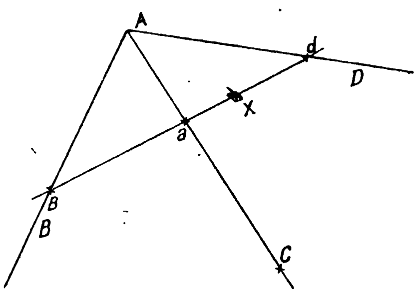


Fig. 73. — Principe de la restitution par la méthode des faisceaux.

Sur la photographie nous choisissons quatre points, A, B, C, D, que nous identifions avec les indications de la carte. Ceci posé, il faut trouver la position sur la carte d'une batterie ennemie que l'on voit en X sur la photographie. Pour cela, on trace les droites AB, AC, AD sur la photographie et sur la carte et, par le point B de la photographie, on mène la droite B*ad* passant par X. Relevant ensuite sur une

bande de papier les quatre points B, *a*, X, *d*, on cherche à placer les points B, *a*, *d* sur les droites correspondantes tracées sur la carte. Ceci fait, le point X est venu en un certain point que l'on joint au point A. On a ainsi une première direction sur laquelle se trouve la batterie (fig. 73).

Pour en avoir une seconde, on recommence la même opération, mais en prenant le point B, par exemple, comme sommet du faisceau, et on a une seconde droite sur la carte qui détermine, par son intersection avec la première, la position exacte de la batterie.

LA SIGNALISATION AÉRIENNE

Les services rendus par les avions pour la signalisation aérienne et le réglage des tirs d'artillerie ne sont plus à compter. Grâce à eux, l'efficacité des bombardements a été accrue dans des conditions incroyables, et chaque coup signalé immédiatement aux batteries.

Pour arriver à ce résultat, il a fallu munir les avions d'appareils leur permettant de correspondre pendant le vol avec les observateurs situés à terre. Au début de la guerre, le système employé était des plus primitifs : l'aviateur revenait au-dessus de la batterie qu'il réglait et laissait tomber les renseignements écrits sur une feuille de papier lestée par un poids auquel était attachée une grande banderole ou renfermée dans une flèche dans laquelle l'air, en s'engouffrant, produisait un sifflement signalant sa chute.

Plus tard, on utilisa les signaux par fusées que lançait l'avion, cartouches lumineuses tirées avec un gros pistolet ou artifices produisant en éclatant des globes de fumée. Lorsque la télégraphie sans fil put être employée, c'est-à-dire lorsque les postes furent assez petits et d'un poids suffisamment restreint pour pouvoir être emportés par les aéro-

planes, on en munit un grand nombre d'avions de réglage. L'antenne, enroulée sur un tambour en temps normal, est développée au-dessous de l'avion en vol et permet d'employer des longueurs d'onde de 25 ou 50 mètres. Quels que soient les services que peut rendre la télégraphie sans fil, elle n'en exige pas moins un matériel assez important, tant sur l'appareil d'observation qu'au poste récepteur, et elle demande un personnel exercé dont l'instruction est assez délicate. Enfin la possibilité pour l'ennemi de recevoir les dépêches ou de les brouiller par des émissions parasites n'est pas sans présenter de graves inconvénients. Nous verrons plus loin que, grâce à l'emploi des amplificateurs, la liaison entre l'avion et le sol a pu être assurée dans les deux sens.

Signaux Morse aériens. — Parmi les autres systèmes de communication employés, il faut citer les signaux Morse à fumée, qui eurent peu de succès auprès des autorités françaises, mais que les Allemands utilisèrent au début de la guerre.

Le principe des appareils à fumée est le suivant. Un réservoir A, dans lequel souffle une trompe F, est rempli de noir de fumée ou de toute autre substance analogue (on peut même employer certains liquides qui à l'air dégagent

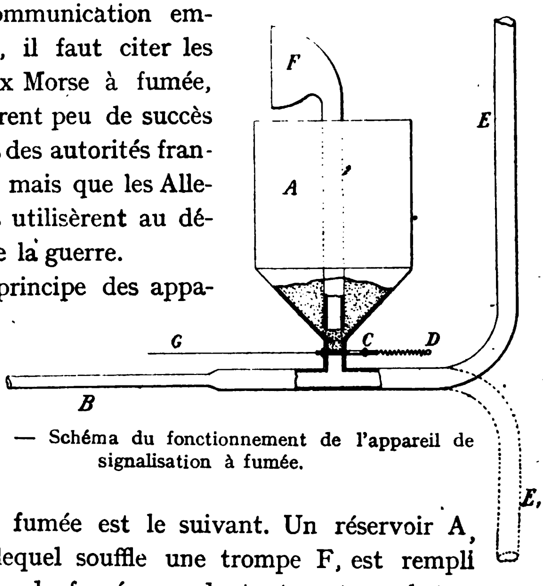


Fig. 74. — Schéma du fonctionnement de l'appareil de signalisation à fumée.

une abondante fumée : chlorures de titane ou d'étain, mélange de chlorhydrine sulfurique et d'anhydride sulfurique tombant sur de la chaux, etc.). Une sorte de lance B communique avec le tuyau d'échappement E du moteur, ou une bouteille d'acide carbonique. Un obturateur C, maintenu

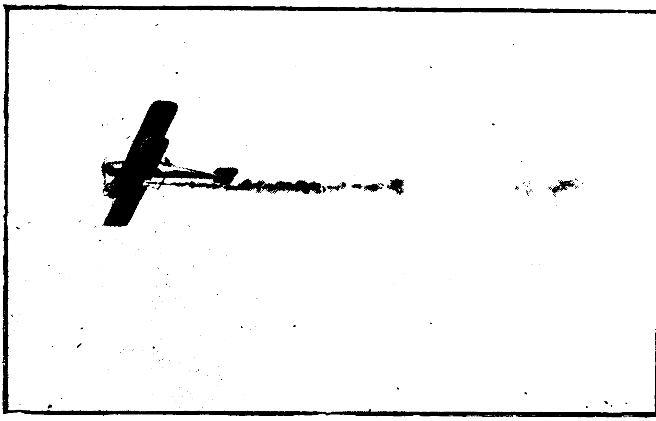


Fig. 75. — Un avion émettant des signaux Morse à fumée.

en place par un ressort D, est commandé par un câble G sous le contrôle de l'aviateur (fig. 74 et 75).

On voit qu'une courte traction sur G donnera un petit nuage de fumée (*point* de l'alphabet Morse), une traction plus prolongée donnant un nuage plus long (*trait* du même alphabet). Rien de plus simple par conséquent, pour l'aviateur, que de *causer* avec un interlocuteur éloigné de 6 à 8 kilomètres et disposant d'une jumelle. La seule condition à remplir est que l'aviateur se déplace à peu près perpendiculairement à la ligne qui joint son appareil à l'observateur. Enfin les aviateurs ont à leur disposition des engins pyrotechniques donnant des fumées colorées, des globes, des chenilles, etc., qui permettent de constituer un véritable code.

II

LA GUERRE AÉRIENNE

Si les « sphériques » de 1870 avaient jeté dans cette guerre une note émouvante et pittoresque, la « conquête du ciel » aura été pendant celle-ci une véritable révolution. En 1914, l'aviation était à peine sortie des limbes et ne pouvait être envisagée que comme un sport et non une *arme*. Quelques escadrilles Blériot, quelques appareils Farman et Voisin étaient en service; si l'on songe aux escadres aériennes, aux armées ailées qui, à certains moments, firent pencher le sort des armes, on restera confondu devant une si foudroyante évolution.

LA RÉSISTANCE DE L'AIR

Chose curieuse, si frappante, si manifeste que soit la puissance du vent, si nombreuses que soient les installations agricoles qui empruntent leur énergie à cette source gratuite et inépuisable, la connaissance exacte des effets du vent,

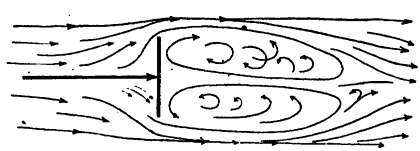


Fig. 76. — Les remous qui se forment lorsqu'un courant d'air rencontre deux plaques planes et parallèles.

leur mesure, leurs lois étaient complètement ignorées lorsqu'il y a quelque dix ans l'aviation, sortant du domaine spéculatif, entra dans l'ère des réalisations. Sans se préoccuper du milieu inconnu et inexploré dans lequel ils rêvaient

de s'aventurer, les aviateurs construisirent des modèles établis empiriquement. Le succès seul était la justification de l'exactitude des idées des inventeurs. En parcourant les milliers de brevets pris et de dispositifs proposés, on a une bien piètre idée de notre science aéronautique d'il y a vingt ans. Mais le grand mouvement dont le colonel Renard fut le promoteur, et qui aboutit à la conquête de l'air, ramena sur

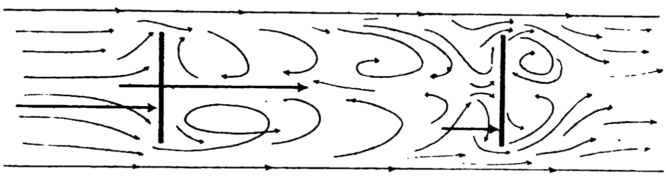


Fig. 77. — Les remous qui se forment derrière une plaque plane circulaire frappée normalement par un courant d'air.

le problème, négligé parce que trop connu, de la résistance de l'air l'attention des savants, et, particulièrement en France, des résultats des plus intéressants ont été acquis.

La pression du vent. — On peut mesurer la force du vent par la pression exercée sur une surface d'un mètre carré, par exemple, qu'il vient frapper normalement ; à cet effet, on peut chercher l'effort qu'il faut appliquer derrière cette surface pour l'empêcher de céder à l'action du courant d'air. D'après les tables des marins établies pour la propulsion des navires à voile, on a les nombres suivants :

Pour une vitesse du vent de :

1 mètre par seconde	la pression est de	1,25^{kg}	par mètre carré.
4 mètres	—	2	—
8	—	8	—
10	—	12,5	—
14	—	24,5	—
20	—	50	—
30	—	112,5	—
40	—	200	—

On voit par là avec quelle effrayante rapidité croissent les pressions avec la vitesse du vent. Par exemple, pour une

vitesse de 10 mètres par seconde, qui est ce qu'on appelle une bonne brise ; l'effort sur chaque mètre carré est de 12,5 kilogrammes ; pour un vent de 25 mètres par seconde (c'est la vitesse des vents dits «de coup de vent»), l'effort est de 78 kilogrammes par mètre carré ! Or si nous supposons qu'un ballon du genre des Zeppelins allemands, dont la longueur est de 200 mètres, le diamètre de 10 mètres, est assailli latéralement par une telle rafale, comme la section offerte à l'air est d'environ 1 300 mètres carrés, c'est une force d'un peu plus de 100 000 kilogrammes qui s'exercera sur le dirigeable. On comprend combien il est illusoire de chercher à retenir, par les efforts musculaires même de plusieurs centaines d'hommes, une pareille enveloppe ainsi assaillie.

Mais l'homme, que dévore la soif de vitesse, a encore trouvé moyen d'aggraver les choses en surajoutant au vent naturel le vent artificiel créé par le déplacement même des appareils. Si un aéroplane se déplace à une vitesse de 100 kilomètres à l'heure, par exemple, tout se passe comme si, étant au repos, ses surfaces étaient assaillies par un vent de 30 mètres par seconde ; elles supporteront donc un effort d'une centaine de kilogrammes par mètre carré.

La même chose s'observe avec nos trains : aux vitesses fréquemment atteintes de 100 kilomètres à l'heure, l'expérience prouve que la résistance de l'air sur le train en marche est à peu près égale à celle que la machine doit vaincre pour la propulsion même. C'est-à-dire que, sur deux tonnes de charbon brûlées par la locomotive, une tonne entière est uniquement employée à vaincre l'air, à repousser l'atmosphère qui se comporte alors comme un milieu visqueux que le train traverse avec peine.

Quelques paradoxes aérodynamiques. — Une idée se présente alors immédiatement à l'esprit. Puisque le déplacement des surfaces dans l'air est si laborieux aux grandes

vitesses que nous voulons atteindre, modifions ces surfaces de façon à en diminuer la résistance. Il suffit de regarder la figure 76, qui montre la disposition, relevée expérimentalement, des filets gazeux sur une plaque carrée se déplaçant normalement dans l'air, pour être tenté de renoncer à jamais rien comprendre à la résistance de l'air. Bien plus, il semble que la nature de la surface qui heurte l'atmosphère n'ait qu'une faible importance, et que ce soit surtout la partie arrière du corps en mouvement qu'il faille considérer. Les coupe-vents dont on a cherché à munir les trains devraient, si l'on en croit les expériences, être placés à l'arrière !

Mais si toute la résistance de l'air n'est pas à l'avant, elle n'est pas non plus à l'arrière, elle est partout où le train ébranle l'atmosphère et y crée des tourbillons : en particulier entre les wagons, et la figure 77 montre entre deux disques parallèles en mouvement les tourbillons aériens qui se produisent.

D'autres résultats surprenants ont aussi été obtenus. Si on considère un solide tel que celui représenté sur la figure 78, formé d'une demi-sphère et d'un cône, et qu'on demande dans quel sens il faut le déplacer pour que la résistance à l'avancement soit minimum, pour tout le monde il semble évident qu'il faille le placer la pointe en avant. C'est le contraire qu'il faut faire : la partie ronde doit être en avant. Et la différence est loin d'être négligeable : avec la bonne disposition, la résistance est moitié de celle que l'on mesure lorsque la pointe est dirigée vers l'avant. C'est pourquoi, dans les dirigeables modernes, en particulier dans ceux construits sur les plans du colonel Renard, la section la plus forte est en avant. Il est curieux de constater, à cette occasion, que la plupart des poissons présentent, derrière une tête très large, un corps qui s'effile vers la queue. Cette

forme est, dans l'eau aussi bien que dans l'air, celle qui présente le moins de résistance à l'avancement, et ainsi la nature avait indiqué la solution que l'homme n'a retrouvée qu'après de longs tâtonnements.

On voit combien il est utile d'étudier expérimentalement les diverses formes de surfaces que l'on propose pour les aéroplanes, ainsi que de soumettre, avant toute construction, les modèles complets d'aéroplanes ou de dirigeables au con-

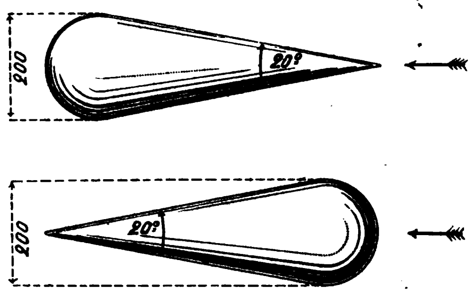


Fig. 78.

trôle expérimental, si on ne veut s'exposer à des mécomptes. Fonctionnement des hélices, comparaison des surfaces portantes, stabilité de l'équilibre, toutes ces questions sont encore à l'heure actuelle mal connues et justifient la création de la science toute moderne de l'aérodynamique. Deux méthodes peuvent être employées : on peut ou bien déplacer l'appareil à étudier dans l'air immobile, c'est la méthode employée à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr, dû à la générosité de M. Deutsch (de la Meurthe), ou bien, ce qui, tout au moins en théorie, revient au même résultat, placer l'appareil immobile dans l'air en mouvement (méthode Eiffel).

La méthode de Saint-Cyr. — A Saint-Cyr, les appareils seront essayés en plein air, car l'Institut, de fondation toute récente, n'est pas encore entièrement terminé. Un chariot,

monté sur une voie ferrée longue de 1 380 mètres et propulsé par un moteur électrique de 130 chevaux, les entraînera à une vitesse qui pourra atteindre 80 kilomètres à l'heure.

La méthode Eiffel. — M. Eiffel, le célèbre ingénieur qui construisit la tour de 300 mètres, s'est passionné pour l'aviation bien avant que l'aéroplane eût conquis l'espace. Dès 1903 il commença à la Tour Eiffel l'étude de la résis-

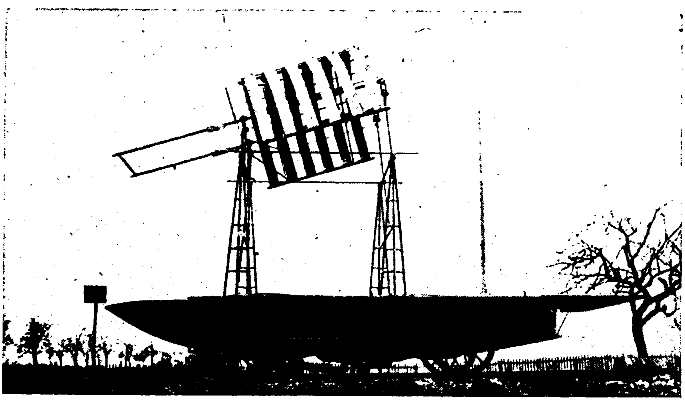


Fig. 79. — La disposition sur chariot des voiliers à étudier au laboratoire de Saint-Cyr.

tance de l'air. Mais pendant qu'il travaillait ainsi, de 1903 à 1906, mettant l'ordre et faisant régner la lumière là où tout n'était que chaos et ténèbres, l'aviation commençait à grandir et, pour continuer les recherches que son développement exigeait, M. Eiffel installa en 1909 au Champ de Mars, puis à Auteuil, un laboratoire dans lequel le principe des essais est tout différent de celui que l'on applique maintenant à Saint-Cyr.

Dans toutes les expériences, le modèle à étudier, qui est une réduction de l'appareil réel, est fixe, et c'est l'air qui est en mouvement.

Le jet d'air dirigé sur les modèles réduits a un diamètre



Fig. 80. — La salle du ventilateur à l'Institut aérodynamique de Saint-Cyr.

de 2 mètres et une vitesse de 32 mètres par seconde, soit



Fig. 81. — Vue intérieure du laboratoire Eiffel.

115 kilomètres par heure. Il n'est pas prudent de s'engager

dans la zone active de la chambre d'expérience si l'on ne veut être soulevé et projeté à terre avec brutalité. Un deuxième appareil permet de produire un jet d'air de 1 mètre de diamètre, mais ayant une vitesse de 40 mètres par seconde,

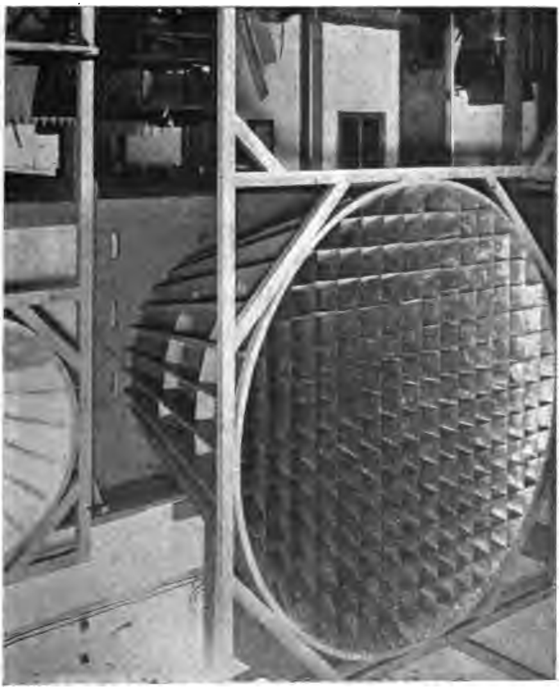


Fig. 82. — Le grand ventilateur du laboratoire Eiffel.

soit 144 kilomètres à l'heure. La disposition pratique est représentée sur la figure 82. L'air sortant du ventilateur pénètre dans une grande chambre, ou diffuseur, d'où le vent est expulsé à travers une surface percée de trous analogues aux nids d'abeilles des radiateurs des automobiles.

On conçoit que, grâce aux moyens puissants dont dispose

ainsi M. Eiffel, les expériences aillent vite et bien et que la moisson de documents augmente rapidement. Malheureusement, à moins d'employer de véritables fleuves *aériens*, on ne peut, comme nous l'avons dit, opérer que sur des modèles réduits ; mais, alors, les résultats ne sont plus applicables à la pratique : si l'aile d'un aéroplane est, par exemple, vingt fois plus grande que celle sur laquelle on opère, et qui lui est en tout point semblable, les effets observés sur l'aéroplane lui-même ne seront pas vingt fois ceux trouvés sur sa réduction. On ne pourra déduire des expériences que des règles grossièrement approchées.

Donnons cependant quelques-uns des résultats acquis, les plus typiques, que nous empruntons aux mémoires de M. Eiffel.

Résistance des ailes. — Supposons d'abord une aile réduite d'aéroplane, rectangulaire, de 90 × 15 centimètres, courbée dans sa longueur avec une flèche de 1/13,5.

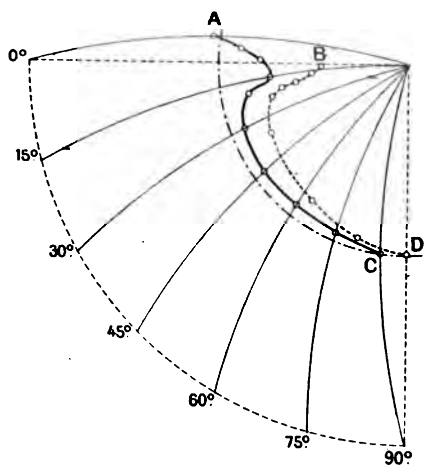


Fig. 83. — Position comparée des centres de pression sur une surface courbe et sur une surface plane : A, plaque courbe ; B, plaque plane.

La figure 83 représente le lieu du centre de pression quand

la plaque tourne autour de l'un de ses grands bords. On voit

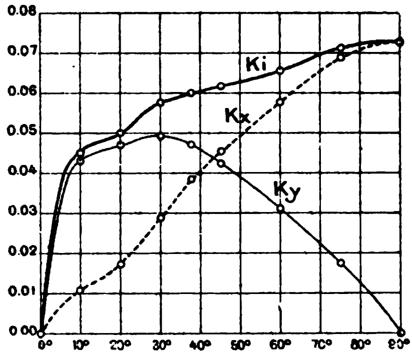


Fig. 84. — Graphique montrant les résultantes et composantes obtenues sur une plaque courbe de 90 × 15 cm. : K*i*, poussées totales unitaires ; K*x*, poussées horizontales unitaires ; K*y*, poussées verticales unitaires.

que le centre de poussée, d'abord au milieu A, se rapproche

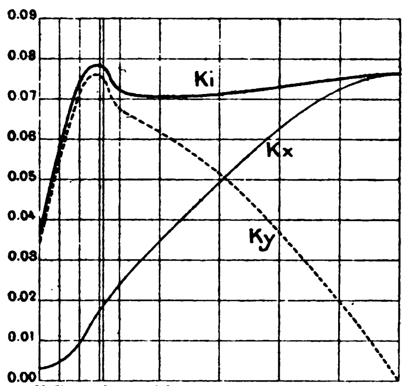


Fig. 85. — Le même graphique obtenu avec une surface plane, plaque de 85 × 15 cm. : K*i*, poussées totales unitaires ; K*x*, poussées horizontales unitaires ; K*y*, poussées verticales unitaires.

du bord antérieur jusqu'à une incidence de 15°, pour s'en éloigner ensuite d'une façon contraire et revenir au milieu C

quand la plaque est verticale. Si, au lieu d'une surface courbe, nous avions une surface plane, le centre de pression est plus près du bord d'attaque quand la surface est horizontale et tend ensuite à se rapprocher du milieu. Dans une surface courbe, la poussée est donc maximum lorsque l'angle d'attaque est nul. Le vent agit alors plus par aspiration sur le plan que par compression sous le plan, résultat très important pour l'établissement des ailes d'aéroplanes.

Si on cherche les résultantes et composantes de la poussée sur ces deux plaques, on obtient les valeurs représentées figures 84 et 85, dans le cas d'un vent de 10 mètres; K*i* est la poussée totale, K étant le coefficient de proportionnalité de la formule

$$W = KSV^2$$

qui donne la résistance W, S étant la surface et V la vitesse.

K*x* est la composante horizontale ou résistance à l'avancement, K*y* est la composante verticale ou face portante.

On voit que K*y* passe par un maximum pour 15° dans le cas d'une surface courbe, puis décroît rapidement pour devenir nulle, K*x* augmentant constamment. Pour la surface plane, l'allure est la même, mais le maximum de la force portante a lieu pour un angle d'attaque de 30° et est bien inférieur en valeur absolue à la valeur trouvée pour la plaque courbe.

Les résultats varient d'ailleurs avec la courbure et les valeurs respectives des dimensions, longueur et largeur, des surfaces.

Chaque marque d'avion est caractérisée par une aile de forme spéciale, et l'étude des résultats obtenus par chacune d'elles nous entraînerait trop loin. Nous citerons seulement, parmi les dernières ailes proposées, l'aile Constantin qui, dans le but d'augmenter la dépression sur le dos de l'aile, a,

sur le bord d'attaque, une rainure concave vers le haut à la façon d'un saute-vent (fig. 86). L'aile Howard Wright a deux ou trois redans sur la face dorsale, ce qui lui donne l'apparence d'être formée de deux ou trois ailes soudées

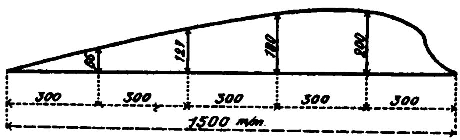


Fig. 86. — L'aile Constantin.

l'une à l'autre (fig. 87). Cette disposition répartit plus uniformément la pression.

Les résultats obtenus avec des séries d'ailes analogues de différentes épaisseurs montrent nettement que, pour une courbure déterminée, une aile est d'autant meilleure qu'elle est plus mince.

En ce qui concerne les allongements, l'étude montre que

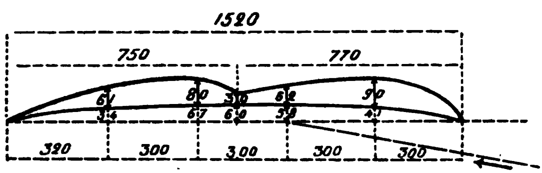


Fig. 87. — L'aile Howard Wright.

la réduction de l'allongement diminue Ky et augmente Kx. L'allongement optimum semble toujours voisin de 6. Il varie toutefois avec l'incidence et la courbure de l'aile. Quand on réduit celle-ci, on peut, sans inconvénient, réduire l'allongement. On pourra, par exemple, prendre pour des flèches de 1/30 un allongement de 5.

L'étude de l'influence des bords latéraux tendrait à prouver qu'une forme trapézoïdale avec la grande base à l'arrière serait préférable à la forme rectangulaire.

Pour les monoplans actuels, la charge par mètre carré varie de 25 à 35 kilogrammes. Les vitesses maxima vont de 95 à 180 kilomètres, les vitesses économiques de 70 à 120 kilomètres à l'heure. La puissance minimum pour 100 kilogrammes de poids transporté varie de 5 à 6 chevaux-vapeur. En ajoutant 2 chevaux-vapeur pour la montée, on peut conclure que la puissance utile nécessaire pour qu'un monoplan vole est de 8 chevaux effectifs par 100 kilogrammes de charge transportée, soit, en comptant sur un rendement de 70 p. 100 pour le propulseur de l'hélice, 11 chevaux environ.

Pour les biplans, les charges par mètre carré de voilure varient de 15 kilogrammes pour le Farman à 30 kilogrammes pour le Bréguet. La puissance utile est moindre que pour les monoplans, 4 à 5 chevaux, de sorte qu'il suffira de prévoir 10 chevaux au moteur par 100 kilogrammes de poids enlevé.

Non seulement il y a intérêt à augmenter la force portante des ailes, mais encore il est indispensable d'étudier toutes les pièces de l'appareil de façon qu'elles n'opposent à leur déplacement dans l'air qu'une résistance insignifiante. Là encore les résultats de l'étude au laboratoire ont fourni les plus précieuses indications, et les plus déconcertantes à première vue.

Résistance des montants. — Les montants d'aéroplane

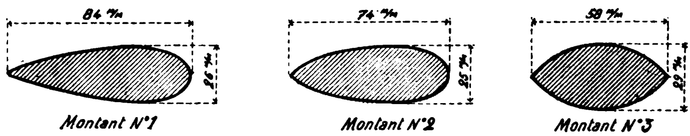


Fig. 88. — Montants d'aéroplanes.

sont fuselés, et l'étude comparative des trois formes représentées figure 88 a montré que le montant le moins résistant est celui dont le rapport des deux dimensions principales,

longueur et maître-couple de la section droite, est de 3 environ. A 25 mètres à la seconde, la résistance à l'avancement d'un tel montant n'est que le neuvième de celle d'un tube cylindrique ayant un diamètre égal au maître-couple. La réduction de résistance que l'on constate quand

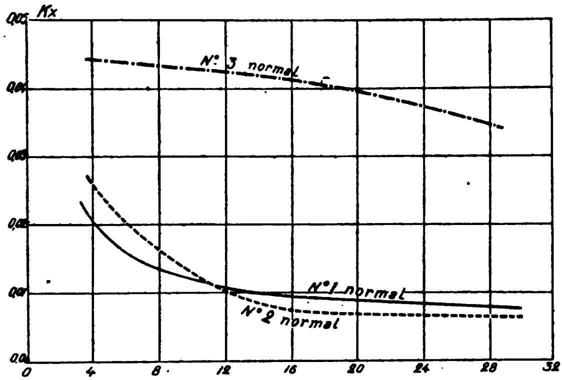


Fig. 89. — Résistance des montants d'aéroplanes.

le montant est incliné sur la normale au vent est faible avec les formes 1 et 2 : 10 p. 100 environ. Elle atteint au contraire 30 p. 100 avec la forme 3.

Le graphique 89 montre les variations du coefficient K*x*, résistance à l'avancement, pour les trois formes de montant. On voit d'abord que ce coefficient diminue, dans les trois cas, quand la vitesse augmente, cette variation étant surtout sensible avec les montants 1 et 2. L'avantage de la forme fuselée dissymétrique apparaissant clairement : le montant 3 qui est symétrique résiste, aux vitesses de vol, 5 fois plus à l'avancement.

Or un avion Maurice Farman type 1914, par exemple, a 60 mètres de montants et l'effort représenté par ceux-ci à une vitesse de 20 mètres à la seconde est de 5,6, 4,8 ou

27,8 kilogrammes, suivant qu'on emploie les profils 1, 2 ou 3 pour les montants.

Les puissances des moteurs qui déplacent à 20 mètres à la seconde des poids de 5,6, 4,8 et 27,8 kilogrammes sont respectivement de 1,5 cheval-vapeur, 1,28 cheval-vapeur et 7,5 chevaux-vapeur. Ajoutons, pour fixer les idées, que la résistance totale à l'avancement du biplan Maurice Farman est de 150 kilogrammes environ. Les montants, avec des formes convenablement fuselées, y entrent donc pour 2 ou 3,5 p. 100.

Résistance des fils. — Les fils tendeurs, dont le nombre est considérable sur les appareils aériens, ainsi que les petits câbles de commande, ne sont pas sans opposer aussi une résistance notable à l'avancement.

Pour les fils normaux au vent, le coefficient de résistance varie peu avec la vitesse et est indépendant du diamètre du fil. On a trouvé pour les fils de 10, 15, 20 et 25 dixièmes de millimètre de diamètre, des résistances par mètre courant, et dans un vent de 10 mètres à la seconde, de 6, 9, 12 et 14,6 grammes. Comme un avion tel que le Farman pris comme exemple présente environ 100 mètres de fil de 25 dixièmes normalement au vent, c'est donc de ce fait une résistance de 5 840 grammes, à 20 mètres par seconde, que les tendeurs opposent au déplacement.

Les fils inclinés ont une résistance variable avec leur inclinaison et plus faible que pour la même longueur de fil normal au vent. Par exemple, par une inclinaison à 30°, la résistance n'est plus que le cinquième de celle du même fil normal.

Les câbles en fils d'acier donnent des résultats analogues à ceux des fils et leur étude montre qu'il vaut mieux, au point de vue résistance de l'air, employer un gros câble que deux petits.

L'étude de la distribution des filets d'air autour d'un fil

placé dans un courant d'air a été faite en détail par le professeur Morris, pour des vitesses ne dépassant pas 37 kilomètres à l'heure, à l'aide d'une méthode électrique qu'il est intéressant de signaler et qui pourra sans doute être appliquée avec avantage dans les études d'aérodynamique.

Toutefois, et il n'est pas inutile d'insister sur ce point, les mesures que l'on peut faire dans les conditions actuelles de la technique n'ont de signification que si la vitesse est notablement inférieure à la vitesse du son. Pour les faibles vitesses, l'appareil de mesure auxiliaire peut ne pas perturber la forme du champ dans lequel il est introduit, et d'autre part le phénomène ne se complique pas des réflexions des ondes de choc.

Nous verrons en effet que pour les vitesses supérieures à celles du son, c'est-à-dire pour les vitesses réalisées en artillerie, il se forme en avant du projectile une onde de compression dite « onde de choc » qui se réfléchit sur les obstacles qu'elle rencontre, venant ainsi profondément altérer la distribution des filets aériens.

La méthode de Morris consiste à utiliser un pont de Wheatstone dont deux des branches opposées sont constituées par des fils de platine et les deux autres par des fils de manganine. On sait que la résistance électrique de la manganine est pratiquement indépendante de la température, tandis que celle du platine s'élève de 0,0038 p. 100 par degré centigrade. L'appareil est construit de telle façon que, pour que le pont soit en équilibre, il faille y faire passer un courant élevant la température des fils à 85° environ.

Tout le système étant placé dans le courant d'air, on détermine, par un tarage préalable par comparaison avec un tube de Pitot, la courbe de variation de l'intensité du courant traversant le pont par suite du refroidissement des branches de platine en fonction de la vitesse du courant

d'air. Ceci étant fait, en déplaçant l'équipage dans le voisinage du fil ou de la tige en expérience on peut facilement trouver la distribution des filets gazeux d'égale vitesse autour de l'obstacle.

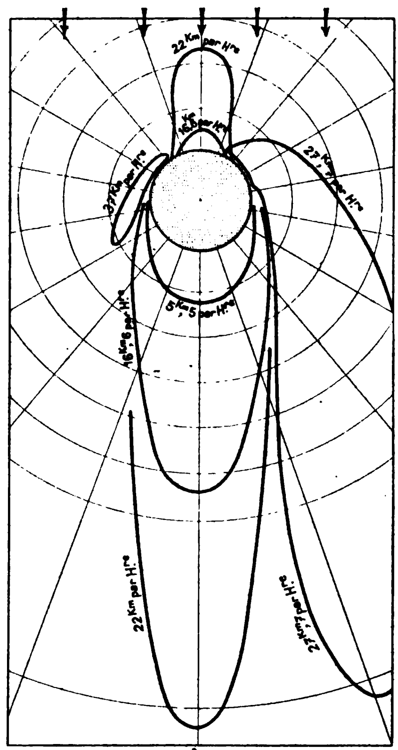


Fig. 90.

La figure 90 montre les résultats obtenus pour une vitesse de $27^{km},7$ à l'heure. On trouve facilement l'« *ombre* » de l'obstacle et on remarquera que la vitesse maxima enregistrée est supérieure de 50 p. 100 dans un cas (20 milles à l'heure) à la vitesse moyenne du courant gazeux.

Résistance des fuselages et accessoires. — Les fuselages sont une des parties de l'avion les plus résistantes au déplacement ; pour les types de Farman étudiés, à 25 mètres à la seconde, leur résistance à l'avancement varie de 9 à 12 kilogrammes. Les monoplans type monocoque ont une résistance de 6 à 8 kilogrammes.

Les roues présentent des coefficients très variables (de 0,044 pour la roue Dorand à 0,065 pour la roue Farman) et le fuselage réduit leur résistance de 50 p. 100. Pour donner une idée de l'importance de ce résultat, disons que, pour le Farman pris comme type, les quatre roues, à 25 mètres à la seconde, offrent une résistance de 7,6 kilogrammes lorsqu'elles ne sont pas entoilées et de 3,7 kilogrammes lorsqu'elles sont entoilées. Elles permettront, dans le second cas, d'emporter une surcharge de 25 kilogrammes, soit 35 litres d'essence !

Résistance des ballons dirigeables. — Enfin, terminons cette rapide revue en donnant quelques renseignements sur les dirigeables et sur l'effet de la résistance de l'air sur les grandes constructions.

L'étude du modèle *Clément-Bayard* montre qu'à l'exception de la pointe, soumise sensiblement à la pression maximum résultant de la vitesse relative, tout le reste de la carène est soumis à des succions. La distribution des pressions change peu avec l'inclinaison de la carène. C'est pour l'inclinaison de 7 p. 100 que la pression sur la pointe est maximum.

Quant à la fraction de la résistance totale due aux différentes parties, on a trouvé :

En marche horizontale (pour une résistance totale de 100), carène seule 44,5 ; nacelles, suspentes, gouvernail vertical, 44,5 ; gouvernails horizontaux, 11. Ces chiffres varient un peu avec l'inclinaison. C'est ainsi que, pour une inclinaison de 7,5 p. 100, les nombres précédents deviennent respectivement 35,5, 54 et 11,5.

Les essais sur le modèle du *Fleurus* ont conduit aux mêmes conclusions en ce qui concerne la distribution des pressions. En ce qui concerne la résistance à l'avancement des différentes parties, la carène nue représente les 27 p. 100 de la résistance totale, et les accessoires (nacelles et gouvernails) 73 p. 100.

Même répartition des pressions sur le modèle du dirigeable *Astra-Torrès*. Quant aux résistances, celle de la carène est les 34 p. 100 de l'effort total, celle de la nacelle et des suspentes 41 p. 100, celles des gouvernails 25 p. 100.

La pression du vent sur les hangars. — Sur les édifices, le vent agit fort peu par sa force vive, à la manière d'un corps solide venant heurter une paroi. Il agit surtout par dépression, contrairement à ce que l'on pensait jusqu'ici. Il n'y a de pressions effectives que sur la face directement exposée au vent; toutes les autres parties sont soumises à des succions. Ces succions sont maximum au sommet du faîtage du toit. On a ainsi l'explication d'un fait fréquemment observé de toitures soulevées et emportées par le vent. Ce n'est pas par l'effet d'un cyclone ascendant, comme on le croit encore généralement, que les faîtages sont arrachés, mais par l'effet d'un vent horizontal suffisamment fort. Lorsque le vent frappe obliquement la grande façade de l'ouvrage, les surpressions diminuent de moitié, mais les dépressions doublent et peuvent atteindre 164 kilogrammes par mètre carré.

La connaissance exacte de l'effort exercé par le vent sur les constructions a une grande importance pratique pour la détermination de la résistance des cheminées d'usine, par exemple. Dans l'art militaire, et c'est pourquoi nous en parlons ici, il a eu une importance capitale pour toutes les constructions forcément légères qui servent à abriter les avions, les dirigeables, les ambulances, les munitions et les approvisionnements de toute nature nécessaires à une armée

en campagne. Si l'on songe qu'un hangar destiné à contenir deux avions a environ 30 mètres de largeur sur 25 mètres de profondeur et 5 mètres de hauteur, on peut se figurer l'effort qu'exerce le vent sur une aussi grande surface de parois. On admet que le coefficient K de la formule qui donne la résistance

$$W = KSV^2$$

est égal à 0,11, c'est-à-dire qu'un vent de 1 mètre par seconde presse sur une surface de 1 mètre carré avec une force de 110 grammes. Quand la vitesse du vent augmente, on a des pressions bien plus considérables.

Pour une vitesse de vent de		10 m/sec	la pression par mètre carré	est de	11 kg.
—	—	20	—	—	44
—	—	30	—	—	99
—	—	40	—	—	176

D'ailleurs, il ne faut pas croire qu'un hangar soumis à l'action du vent éprouve une pression sur toute sa surface. Bien au contraire, la face opposée au courant d'air est l'objet d'une dépression considérable. La figure 91 montre la répartition des pressions et des dépressions sur un hangar ordinaire dans le cas d'un vent de 40 mètres à la seconde, un vent de bourrasque.

Sur la partie verticale directement frappée, la pression moyenne est de 82 kilogrammes par mètre carré. Sur le pan de toiture que le vent rencontre ensuite, la moyenne des pressions positives est de 18 à 19 kilogrammes et le point d'application de la poussée résultante est à peu près au tiers du pan à partir de la sablière. Ensuite, sur le même pan, la pression s'annule, puis change de sens et devient une dépression qui va en augmentant pour atteindre, sur la partie opposée au vent, une valeur à peu près existante de 38 à 39 kilogrammes.

Ainsi donc une partie du hangar tend à s'aplatir sous

l'action du vent et l'autre, au contraire, à se soulever, à être aspirée ; c'est ce qui permet de comprendre les effets de soulèvement de toiture souvent constatés par les grands vents.

Si le hangar, au lieu d'être complètement fermé, possède

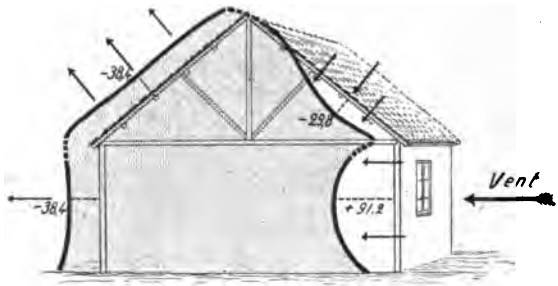


Fig. 91. — Comment s'exerce la pression du vent sur un hangar ordinaire.

un lanterneau ouvert, il s'établit par ce lanterneau un équilibre entre l'air intérieur et l'atmosphère extérieure. La figure 92 montre la répartition des pressions sur un hangar

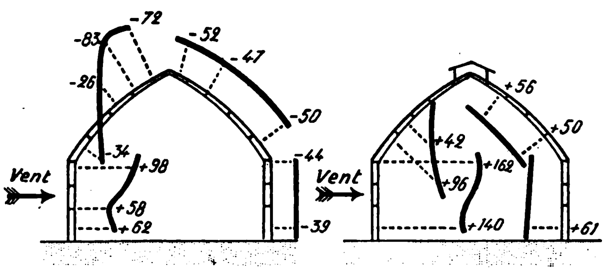


Fig. 92. — La répartition des efforts du vent sur un hangar muni d'un lanterneau et sur un hangar type Belfort.

type Belfort complètement fermé et muni d'un lanterneau. On voit que l'effet de ce dernier est favorable et diminue les effets du soulèvement de la toiture.

Si, en plus, on pratique d'autres ouvertures, en des endroits

convenablement choisis, on peut modifier dans un sens favorable les efforts totaux auxquels la construction est soumise.

La résistance de l'air aux très grandes vitesses. — Les résultats qui ont été établis en aérodynamique pour des vitesses de vent de 30 à 40 mètres ont rendu les plus grands services en aviation où justement les vitesses sont de cet ordre de grandeur.

Mais ils ne peuvent fournir aucune indication sur la balistique extérieure ; ils ne donnent même pas une forme approchée de la loi de résistance.

Les vitesses des projectiles sont très variables, mais elles sont comprises entre 400 et 1 500 mètres par seconde. Or, toutes les lois de propagation des phénomènes dans l'air montrent que, pour une vitesse égale à la vitesse du son, un changement de régime se produit ; il y a *discontinuité* (naissance de l'onde de choc, par exemple). D'autre part, certaines actions prépondérantes aux faibles vitesses disparaissent complètement aux grandes vitesses.

C'est ainsi que nous avons vu que la forme de la partie avant d'un corps avait infiniment moins d'importance que le profil de l'arrière. Aux grandes vitesses de l'artillerie, c'est le contraire qui se produit : la résistance de l'ogive est prépondérante, de sorte que les formes optima trouvées dans un cas ne sont pas applicables dans l'autre.

Le problème en artillerie se complique d'ailleurs sitôt que l'on veut se rapprocher de la réalité. Comme nous le verrons, le projectile, par suite de son mouvement de rotation rapide, se comporte comme un gyroscope, son axe est animé d'un mouvement de nutation et, par suite, la pointe de l'ogive « festonne » sur la trajectoire ; la surface offerte à l'air change donc à chaque instant, et avec elle la grandeur et la direction de la résistance. Les expériences dans lesquelles on placerait un projectile immobile dans un cou-

rant d'air de 500 à 1 000 mètres ne permettraient donc pas de déduire comment le même projectile se comporte dans le tir réel.

Les balisticiens ont admis un certain nombre de formules surtout choisies, semble-t-il, pour que les équations dans lesquelles on les introduit soient intégrables et dont la valeur et la réalité sont absolument illusoires.

Tout est encore à faire dans le domaine de la balistique expérimentale.

LA MESURE DE LA VITESSE DU VENT EN AVION

En ce qui concerne les aéroplanes, l'effet du vent sur la direction est considérable, car, dans les hautes régions de l'atmosphère, il n'existe pour ainsi dire jamais de calme parfait, et sauf dans des cas isolés, comme celui des vents alizés ou des moussons des mers de Chine, les courants d'air n'ont ni vitesse régulière, ni direction bien définie.

En règle générale, il est donc presque impossible de prévoir la durée précise d'un vol pour un parcours donné, même si on connaît la direction et la force du vent au point de départ, parce qu'on peut rencontrer sur sa route des courants de direction et des vitesses variant avec l'altitude.

Bien qu'on ne puisse par suite établir des règles fixes d'estimation, il est cependant intéressant d'évaluer avec une précision suffisante le temps nécessaire pour exécuter un vol en ligne droite, d'un point à un autre, avec retour au premier.

Supposons, par exemple, que le vent souffle à une vitesse de v mètres par seconde et dans la direction où doit se diriger l'avion. A première vue, il semble que l'aéroplane regagnera en vitesse au retour ce qu'il a perdu à l'aller par suite du vent debout. Cette conclusion n'est pas exacte.

En effet, si l'avion fait v_0 mètres par seconde et si la dis-

tance à parcourir est D, le temps de trajet sera, à l'aller, $\frac{D}{v_0 - v}$ secondes et au retour $\frac{D}{v_0 + v}$ secondes.

Si nous ajoutons ces deux temps, on aura pour durée totale du voyage $\frac{2Dv_0}{v_0^2 - v^2}$, que l'on peut écrire $\frac{2\,D}{v_0 - \frac{v^2}{v_0}}$. Au contraire, en air calme, ce temps serait simplement $\frac{2\,D}{v_0}$. La valeur numérique de la première expression est toujours supérieure à celle de la seconde. Le voyage aller et retour avec ou contre un vent constant est donc toujours plus long qu'en air calme. En particulier, pour $v = v_0$ le temps est infini, puisque dans un sens l'appareil fait du « sur place ».

Prenons un exemple numérique : le vent souffle à 10 mètres à la seconde, et l'avion a une vitesse propre de 30 mètres. Il doit accomplir, aller et retour, un trajet de 100 kilomètres. Il mettra 62 minutes 3 secondes. En air calme, il accomplirait sa mission en 55 minutes 34 secondes. La durée du vol est donc plus considérable. Il importe, par suite, surtout dans le cas de raids à longue distance, comme celui de Belfort à Friedrichshafen (200 kilomètres), de connaître exactement le temps probable du vol, pour emporter la quantité d'essence et d'huile nécessaire pour ne pas être exposé à un atterrissage en pays ennemi.

L'indicateur Étévé. — Aussi a-t-on cherché à donner au pilote des appareils lui permettant d'apprécier la force du vent et de contrôler sa vitesse par rapport au sol. Parmi ceux-ci, l'un des plus anciens est l'indicateur de vitesse Etévé. Cet appareil se compose uniquement d'une tige G équilibrée par une pièce de plomb K de manière que le centre de gravité soit confondu avec le centre d'oscillation en O. La surface S recevant l'action du vent fait basculer la

tige G d'un certain angle correspondant à la force du vent relatif, et ce mouvement entraîne l'aiguille H qui se déplace devant un cadran G. Ce cadran, taillé dans la plaque évidée A en aluminium qui forme girouette, porte un trait de repère très visible R marqué en rouge (fig. 93).

La surface S peut avoir une forme quelconque ; dans tous

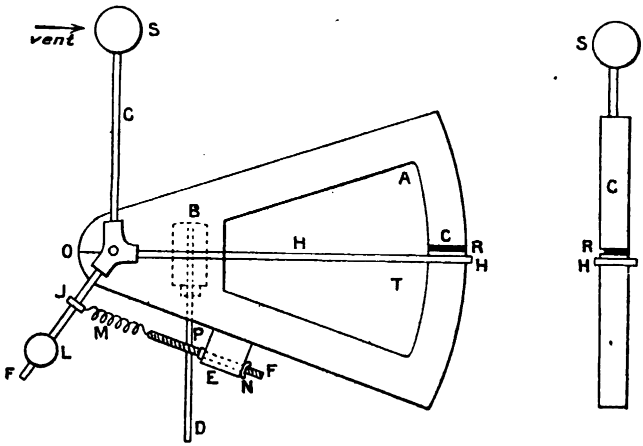


Fig. 93. — L'indicateur de vitesse du capitaine Étévé (vu de face et de profil).

les cas, le fonctionnement de l'appareil est évident ; on le règle en agissant sur le ressort M de manière que, dans un vol d'essai fait à petite distance du sol, l'aiguille se trouve sur le trait de repère.

Il suffit pour cela de noter, dans ce vol d'essai, la position prise par l'aiguille au moment où l'on sent que l'aéroplane est bien en équilibre. Ayant atterri, le pilote replace artificiellement l'aiguille dans cette même position en déplaçant une masse de réglage T; puis, à l'aide de l'écrou N, il fait avancer ou reculer la tige filetée F qui, par l'intermédiaire du ressort M, fait basculer le levier OJ et, par suite,

l'aiguille H. On s'arrête quand cette dernière aiguille est venue en coïncidence avec le trait de repère R.

Ceci fait, l'aviateur peut s'envoler pour un raid quelconque ; il sait, en voyant les déplacements de l'aiguille par rapport au trait de repère, si sa vitesse relative augmente ou diminue.

L'indicateur Venturi. — Un autre appareil est basé sur le principe de l'ajutage de Venturi. On sait que, lorsqu'un courant gazeux rapide s'échappe d'un orifice étroit, la veine qui se forme a une section variable ; elle va en se rétrécissant d'abord, pour ensuite s'élargir. Autour de la partie rétrécie, il existe une zone de dépression, d'autant plus importante que la vitesse d'écoulement est plus grande. C'est sur ce principe que sont basés les injecteurs Giffard servant à l'alimentation des chaudières, les trompes à eau et, plus modestement, les vaporisateurs.

Si donc, en avant de l'avion, à un endroit où les remous causés par l'hélice et les plans ne se font pas sentir, nous disposons un entonnoir dans lequel s'engouffre l'air, et si cet entonnoir est muni d'un petit ajutage, le courant d'air, en s'écoulant, déterminera un vide partiel. Un tube flexible de petite section transmet cette dépression à un manomètre placé sous les yeux du pilote et gradué non en pression, mais en vitesse de l'air. Le pilote aura donc directement la valeur de sa vitesse de déplacement par rapport à l'air, renseignement précieux sur la marche de son appareil.

Vitesse par rapport au sol. — Mais ce n'est pas le seul renseignement qui soit utile, car il importe aussi de connaître le déplacement de l'avion par rapport au sol. De nombreux appareils permettent de le déterminer avec précision. Sans entrer dans leurs détails, qu'il n'est pas possible de publier actuellement, décrivons simplement leur principe.

A l'aide d'un viseur approprié (lunette, collimateur, etc.),

on vise un point P sur le sol, la lunette étant dans une position déterminée A, et en même temps on déclanche un chronomètre. On arrête le chronomètre quand on revoit le point visé dans la lunette occupant une position B également déterminée (fig. 94) faisant un angle *a* avec la précédente. On a ainsi le temps *t* mis par l'avion pour parcourir la dis-

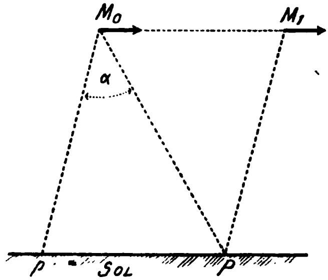


Fig. 94. — Mesure de la vitesse de l'avion par rapport au sol.

tance M_0M_1 ou P*p*. Or, comme on connaît l'altitude de l'avion donnée par le baromètre enregistreur, l'angle *a* correspond, sur le sol, à une distance connue *d* que donne une table annexée à l'appareil. Ayant le temps *t* mis pour parcourir au-dessus du sol une distance *d*, on en tire immédiatement la vitesse relative de l'avion. Comme, d'autre part, on connaît, par l'indicateur, la vitesse propre au moment de la mesure, on en déduit très exactement la vitesse du courant aérien dans lequel l'avion se déplace.

Lors des réceptions des avions et de l'étude des nouveaux types, il importe d'avoir des données précises sur la vitesse de l'appareil à diverses altitudes.

Nombreux sont les procédés employés à ce sujet : enregistrement photographique ou cinématographique, télémétrage instantané, système de glaces réfléchissant l'avion sur un plan de verre quadrillé sur lequel on trace sa route pendant l'essai, etc.

Quels qu'ils soient, le problème est extrêmement compliqué, à cause de deux facteurs inconnus et cependant prépondérants : la vitesse du vent à l'altitude du vol et l'état barométrique et hygrométrique de la haute atmosphère.

Les résultats peuvent être entièrement faussés par leur variation au cours des essais successifs; aussi faut-il prendre les plus grandes précautions avant de se décider entre deux types d'avions voisins. Trop souvent, en France, ces précautions furent négligées. En Angleterre, au contraire, grâce au concours du National Physical Laboratory et du Royal Air Flight S^e^, des méthodes très intéressantes ont été instituées.

Ces éléments de route sont indispensables non seulement pour calculer la durée du vol, mais encore pour permettre de faire un bombardement effectif, comme nous allons le voir.

LE BOMBARDEMENT PAR AVION

Le problème du lancement des bombes par avion a fait depuis le début de la guerre l'objet de nombreux mémoires, et le nombre des appareils dits « de visée » est très grand.

Lorsqu'un avion lâche un projectile, que nous supposerons disposé horizontalement sous la carlingue de l'appareil, tout se passe comme s'il était lancé d'un point fixe, qui serait la position de l'avion au moment du tir, avec un canon pointé horizontalement et tirant avec une vitesse initiale égale à celle de l'avion. Dans ces conditions, l'obus suit dans l'espace une certaine courbe dont il s'agit de déterminer la rencontre avec le sol en un point qui est le but.

Trajectoire par rapport au sol. — Supposons d'abord que nous rapportions la courbe à des axes de coordonnées liés au sol. La courbe est la trajectoire d'un corps pesant lancé dans l'air avec une certaine vitesse horizontale, elle a une forme parabolique qu'il est facile de déterminer. C'est un problème classique, dont la solution a été donnée par Newton et que l'on applique constamment dans le calcul des trajectoires des obus. La solution est, dans le cas qui nous occupe, d'autant plus parfaite que le facteur perturbant, la résistance de l'air, a une expression simple et très suffisamment exacte. On l'admet proportionnelle au carré de la vitesse, le facteur de proportionnalité étant constant. Dans l'artillerie, où les vitesses dépassent celles du son, la résistance de l'air est une fonction compliquée et l'approximation est moins certaine. Et pourtant on sait avec quelle précision on arrive à régler le tir.

Sans entrer dans l'exposé des procédés permettant le calcul de la trajectoire, donnons les résultats les plus intéressants.

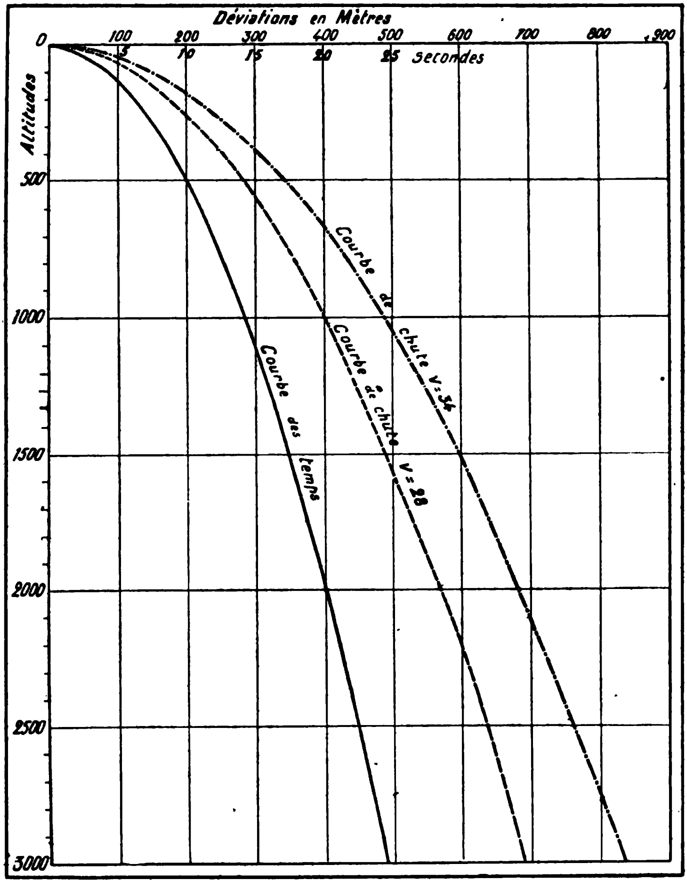


Fig. 95. — Courbe indiquant les trajectoires moyennes des projectiles (déviations et temps de chute) pour des altitudes de 0 à 3 000 mètres et des vitesses de l'avion de 28 à 34 mètres à la seconde.

Naturellement nous ne ferons figurer dans le tableau suivant que les « ordres de grandeur » des diverses quantités. Les chiffres eux-mêmes ne présentant pas d'intérêt, puisqu'ils varient avec chaque projectile et chaque mode d'em-

pennage. Nous supposerons que l'avion a une vitesse propre de 28 mètres par seconde (108 kilomètres à l'heure) et que le vent est nul.

ALTITUDES.	TEMPS de chute.	DÉVIATION par rapport à la verticale du point de lancement en mètres.
1 000 mètres.	14 secondes.	400 mètres.
1 500 —	17 —	500 —
2 000 —	20 —	570 —
2 500 —	23 —	640 —
3 000 —	25 —	700 —

Pour un avion volant à 34 mètres à la seconde (122 kilomètres à l'heure), les temps de chute sont sensiblement les mêmes, mais les déviations sont respectivement de 490, 600, 760, 806, 840 mètres.

Si maintenant l'avion vole dans un air en mouvement, et

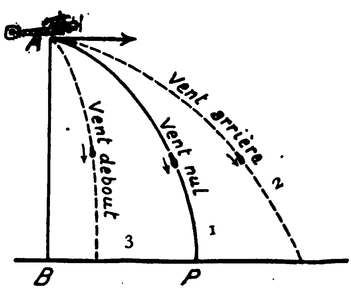


Fig. 96. — Les différentes trajectoires d'un projectile suivant la disposition de l'avion par rapport au vent.

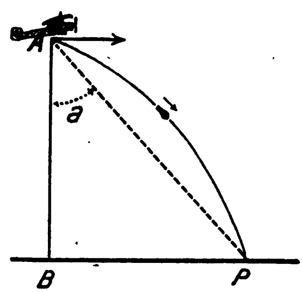


Fig. 97. — L'angle de visée *a* sous lequel il faut voir le but pour que le projectile l'atteigne.

que le vent ait une vitesse propre de 10 mètres à la seconde, il aura pour effet d'entraîner toute la trajectoire avec cette vitesse ; c'est dire que la déviation devra être augmentée ou diminuée, suivant que le vent est arrière ou debout par rapport à l'appareil au moment du lancement, respectivement

de 140 mètres, 170, 200, 230 ou 250 pour les altitudes du tableau, et la trajectoire, au lieu d'avoir la forme 1, aura l'une des formes 2 ou 3, et le point de chute sera considérablement différent (fig. 96).

On voit donc que la déviation peut atteindre facilement 1 kilomètre. Aussi le jet des bombes à la main, sans appareil de visée, tel qu'il se pratiquait au début de la guerre, ne pouvait-il donner que des résultats excessivement médiocres.

Principe des appareils de visée du premier type. — En nous plaçant toujours dans l'hypothèse d'un observateur sur le sol, qui voit la trajectoire telle que nous venons de la décrire, le problème du tir revient à déterminer l'angle *a* sous lequel doit être vu le but au moment où on lâche le projectile (fig. 97). Or on connaît par le calcul, pour chaque altitude et pour les différentes vitesses de vent, les valeurs de la déviation BP. Il est donc facile d'imaginer un appareil donnant automatiquement pour chaque avion cet angle *a*, à l'aide d'une table à double entrée ou d'une courbe dont les coordonnées sont les altitudes d'une part et, d'autre part, les vitesses du vent mesurées comme nous l'avons indiqué précédemment, ou telles fonctions de ces vitesses que l'on veut. Une première série d'appareils de visée sont basés sur ce principe.

Trajectoire par rapport à l'avion. — On peut envisager le problème d'une autre façon. Supposons que nous rapportions la courbe de chute du projectile, non à des axes sur le sol, mais à des axes liés à l'avion. C'est-à-dire examinons non plus ce que voit l'observateur terrestre, mais la trajectoire que le projectile décrit, par rapport au bombardier dans sa carlingue.

Remarquons d'abord que, quel que soit le vent régnant, comme il emporte à la fois avion et projectile (nous supposons, bien entendu, que le régime du vent est le même dans

tout l'espace que parcourt le projectile), il n'aura aucune influence sur la trajectoire *relative* du projectile par rapport à l'avion. Nous pouvons donc supposer l'air calme.

Principe des appareils de visée du second type. — Si nous étions dans le vide, d'après une proposition classique, le projectile semblerait, par rapport à l'avion, descendre suivant la verticale. C'est-à-dire qu'en regardant dans le tube de lancement supposé vertical, on verrait le projectile descendre suivant l'axe du tube, le paysage défilant au-dessous de lui avec une vitesse égale et opposée à celle avec laquelle vole l'avion. Comme on connaît le temps de chute pour l'altitude de tir et la vitesse de l'avion, il suffirait de lâcher le projectile un nombre connu de secondes avant de passer dans la verticale du but, ou, ce qui revient au même, lorsqu'on verra le but sous un angle D.

Mais la résistance de l'air intervient et freine le projectile aussi bien dans son déplacement vertical que dans son déplacement horizontal. Il sera donc en retard sur l'avion dans son mouvement horizontal et, dans le tube de lancement, on le verra peu à peu rester en arrière, « traîner » sur la verticale. C'est-à-dire qu'il décrira, pour le bombardier, une courbe partant tangentiellement à la verticale et s'en écartant ensuite de plus en plus vers l'arrière. On peut calculer pour chaque projectile, à chaque vitesse d'avion et à chaque altitude, le traînage *d* qui lui correspond, et par suite il faudra lâcher le projectile lorsqu'on verra le but sous l'angle D — *d*.

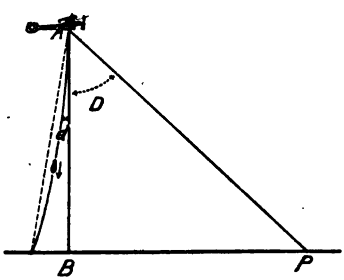


Fig. 98. — Trajectoire d'une bombe par rapport à l'aviateur.

Il est bien évident que cet angle D — *d* est égal à l'angle *a* que l'on détermine dans les appareils précédents, car il n'y a qu'un point A de l'espace d'où l'on puisse atteindre le but dans des conditions données, mais nous avons deux façons de déterminer ce point et elles ont servi à établir deux séries d'appareils de visée.

Les conditions de vol pour le bombardement. — La détermination du moment de lancement du projectile à l'aide d'un quelconque des nombreux viseurs en service suppose remplies certaines conditions qui incombent au pilote et non plus au bombardier. Il faut que l'avion vole horizontalement aussi bien au moment de la détermination de sa vitesse par rapport au sol qu'au moment où le projectile sera libéré. De plus, il faut évidemment que le plan vertical passant par la vitesse de l'avion à cet instant passe aussi par le but pour que le projectile qui se déplacera dans ce plan n'ait pas d'écart latéral, de *dérive,* ceci toujours dans le cas où l'on vole dans le vent.

Ces conditions ne sont pas si aisées à remplir qu'elles le paraissent, et beaucoup d'excellents pilotes seraient très étonnés si on leur disait qu'ils volent d'une façon très médiocre, qui ne permet pas d'effectuer un bombardement précis. Il faut une grande habitude et une entente parfaite avec le bombardier pour que les manœuvres qui règlent le tir, et sont ici partagées entre deux opérateurs, aient la concordance nécessaire.

Il est d'ailleurs très difficile de déterminer un plan vertical dans un avion en vol. Théoriquement, il est défini par deux droites, l'une parallèle à l'axe de l'hélice propulsive, l'autre verticale. C'est cette verticale qu'il est délicat de réaliser pratiquement, par suite de l'inertie de tout système matériel. Les mouvements propres de l'avion étant assez rapides, si l'on amortit trop le système (bille roulant dans un

tube, par exemple), on n'a plus aucune précision. Dans le cas contraire, il est impossible d'arriver à une position de repos pour la partie verticale de l'appareil et il en résulte la plus grande incertitude dans les indications.

Précision du tir en avion et résultats. — L'efficacité des bombardements n'est véritable que si un grand nombre de bombes sont lancées, ce qui augmente les chances de réaliser des coups au but.

Un journal anglais, *The Aeroplane*, s'appuyant sur des chiffres, malheureusement très abondants, relatifs aux bombardements de Londres, a cherché à calculer les chances d'être atteint par une bombe allemande.

L'auteur anglais considère la superficie de l'agglomération londonienne, qui est de 750 kilomètres carrés, d'une part, et, de l'autre, la zone dangereuse autour du point d'impact d'une bombe de calibre moyen. Dans un rayon de 35 à 40 mètres autour de ce point, les effets de l'explosion sont extrêmement meurtriers ; c'est la zone de mort. Plus loin, comme il a été constaté que l'angle moyen des trajectoires avec le sol était d'environ 45 degrés, on en déduit que toute personne debout à plus de $4^{m},50$ du point de chute de la bombe peut être indemne de blessure, par « fragmentation », l'éclat d'obus, à cette distance, étant supposé passer au-dessus de 2 mètres du sol. Mais, d'autre part, il existe une seconde zone dangereuse : c'est celle couverte par les éclats quand ils retombent au sol. Cette zone affecte la forme d'une couronne d'environ un mètre de large, et qui aurait pour rayon moyen 200 mètres, le centre étant naturellement le point de chute de la bombe.

En ajoutant la superficie des deux zones, on arrive à une surface totale de 6 000 mètres carrés environ, que le calculateur porte à 10 000. Ceci fait, il divise la superficie de Londres en 75 000 zones dangereuses de 10 000 mètres carrés

Coefficients fractionnaires du risque pour un habitant.

POSITION DANS LAQUELLE SE TROUVE L'HABITANT	NOMBRE DE BOMBES LANCÉES				
	1	**10**	**100**	**500**	**5.000**
Dans un appartement de 45 mètres carrés au rez-de-chaussée d'une maison bien bâtie : trois bons étages et toit	96.000.000	9.600.000	960.000	192.000	19.200
Idem dans une maison assez bien bâtie à deux étages	72.000.000	7.200.000	720.000	144.000	14.400
Idem dans une maison dont la construction laisse à désirer	48.000.000	4.800.000	480.000	96.000	9.600
Dans un appartement bien construit de 45 mètres carrés au niveau du sol, sans abri supérieur	24.000.000	2.400.000	240.000	48.000	4.800
En terrain découvert	150.000	15.000	1.500	300	30

chacune. Ce qui revient à dire que pour une bombe lancée sur Londres, il existe seulement une chance sur 75 000 pour qu'elle tombe dans une zone déterminée. Et comme dans chacune de celles-ci, il n'est pas exagéré de dire qu'un habitant a une chance sur deux pour ne pas être touché, on estime qu'en terrain découvert et pour une bombe lancée sur Londres, un habitant a seulement un cent cinquante millième de chance d'être atteint.

Nous passerons la discussion de la valeur des abris couverts, de la protection offerte par les maisons à rez-de-chaussée unique, à un ou plusieurs étages. Ce qui est intéressant, ce sont les déductions que nous reproduisons. Dans ce tableau, les chiffres indiquent pour chaque genre de protection le dénominateur fractionnaire du risque, d'après le nombre de bombes lancées. Ajoutons qu'à Londres la superficie des espaces libres étant trois fois plus grande que celle des espaces bâtis, il y a trois chances contre une pour que les bombes tombent en terrain découvert.

LE PROBLÈME DU DIRIGEABLE

Les dirigeables, plus peut-être encore que les sous-marins, ont retenu l'attention du public au cours de cette guerre. Avant de donner quelques renseignements sur leur constitution et les systèmes employés, nous croyons devoir étudier au point de vue physique le problème général de la navigation aérienne.

La vitesse critique. — La forme convenable de l'enveloppe ou de la carène d'un dirigeable, l'invariabilité de cette forme, la suppression des mouvements du gaz à l'intérieur du ballon, la rigidité de la suspension sont des conditions nécessaires de la construction des ballons dirigeables, mais ce ne sont pas les conditions suffisantes pour n'avoir qu'un petit angle de tangage et, pour un ballon

donné, elles sont d'autant moins suffisantes que la vitesse propre du dirigeable est plus grande. Le colonel Ch. Renard, à qui l'on doit la création de l'aéronautique en France, avait donné le nom de *vitesse critique* à la vitesse pour laquelle, le grand axe de la carène devenant vertical, le ballon se cabrerait.

Si l'on choisit comme point de suspension d'une carène

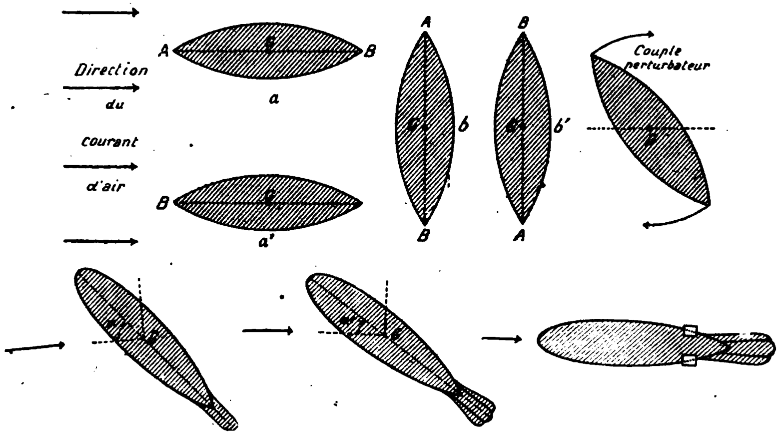


Fig. 99. — Les positions que prennent dans un courant d'air des volumes empennés ou non.

symétrique le centre de gravité de son volume et comme axe de suspension un axe horizontal normal à la direction de propagation du courant d'air, on voit qu'il existe deux positions d'équilibre instable *a* et *a'* (fig. 99) et deux positions d'équilibre stable *b* et *b'*. Si l'on cherche à maintenir la carène dans une position intermédiaire, il est nécessaire de faire agir un couple redresseur compensant le couple perturbateur dû à l'action du courant d'air. Ce couple stabilisateur est constitué par le poids de la nacelle.

Le rôle des empennages. — Pour accroître la vitesse cri-

tique, on donne alors à la carène une forme de flèche empennée. Dans ces conditions, l'axe longitudinal se place non plus perpendiculairement au courant d'air, mais dans une position oblique et d'autant plus éloignée de la perpendiculaire que la queue est plus longue. Si enfin on ajoute sur la queue elle-même un véritable empennage, la carène se redresse encore davantage. On voit donc que les plans d'empennage introduisent un couple opposé au couple perturbateur et du même sens que le couple stabilisateur. Avec un empennage suffisamment développé, la position d'équilibre est telle que l'axe du mobile devient parallèle à la direction du vent. C'est ce qui a lieu pour les cerfs-volants ballons.

L'empennage a encore un autre effet. Considérons un aérostat au repos et supposons qu'il se mette à tanguer (fig. 100). Il se comporte alors comme un pendule qui se meut dans un milieu résistant. Le couple résistant dû à la nacelle ne doit pas être confondu avec le couple redresseur dont nous venons de parler et qui n'agit que pendant la marche, par les réactions de l'air sur les surfaces d'empennage. Ces dernières introduisent, elles aussi, un couple résistant qui a pour effet d'éteindre les oscillations de l'aérostat même quand celui-ci ne progresse pas sous l'action de son hélice.

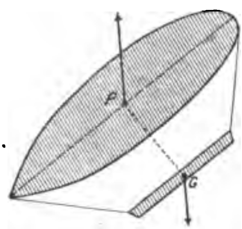


Fig. 100. — Les forces qui agissent sur un ballon pendant le tangage.

L'expérience a montré que le mouvement de tangage s'accompagne toujours de mouvements verticaux qui ont pour effet d'atténuer les oscillations et contribuent ainsi à reculer les limites de la vitesse critique et à réduire les surfaces d'empennage nécessaires pour assurer la stabilité de route.

L'action des gouvernails. — Nous n'avons rien dit encore des gouvernails. La théorie des conditions d'équilibre dynamique d'un ballon dirigeable montre qu'il existe dans l'aérostat des points situés à une distance parfaitement définie du centre de gravité où l'application d'une force normale à l'axe ne modifie pas l'inclinaison, tout en provoquant des mouvements verticaux. C'est en ces points

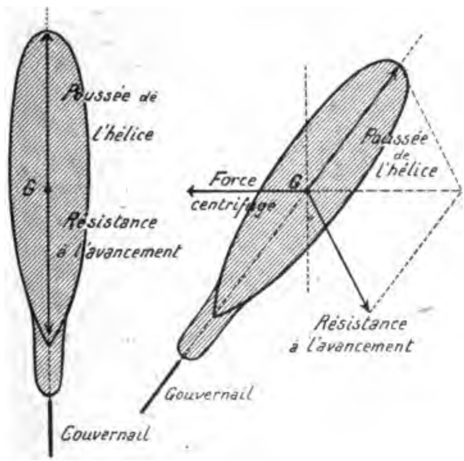


Fig. 101. — Les forces qui s'exercent sur un dirigeable en marche.

que l'on pourra appliquer les hélices ascensionnelles, les câbles de retenue, etc., sans provoquer de mouvements de tangage.

Lorsqu'un ballon se propulse en ligne droite, pointe au vent, avec sa barre dans le plan neutre, il y a équilibre dans le plan horizontal entre la résistance à l'avancement et la poussée de l'hélice. Mais un tel régime est instable, la moindre perturbation fait tourner le ballon autour de la verticale du centre de gravité, à moins que le pilote n'intervienne par un coup de barre approprié. S'il n'intervient pas, dès que le ballon commence à tourner, il reçoit un

courant d'air oblique ; la poussée de l'hélice et la résistance à l'avancement ne sont plus directement opposées. S'il se produit un nouveau mouvement de régime, la force centrifuge fait alors équilibre à la résultante de la poussée et de la résistance : le dirigeable se met à tourner en cercle. On voit donc que, pour maintenir le cap dans une direction donnée, le pilote doit avoir constamment la main à la barre.

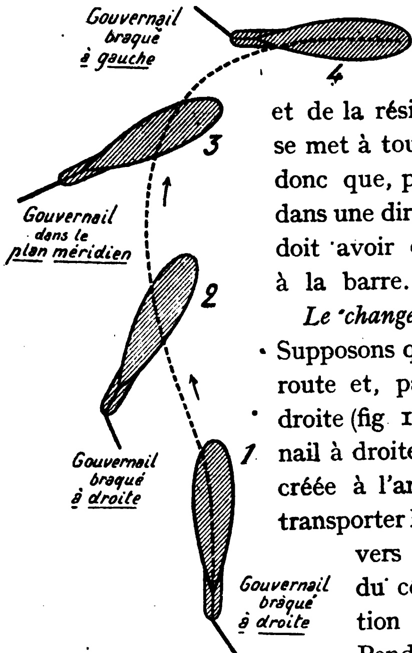


Fig. 102. — Comment un dirigeable change de direction.

Le changement de direction. — Supposons qu'il veuille changer de route et, par exemple, tourner à droite (fig. 102). Il amène le gouvernail à droite (position 1). La force créée à l'arrière a pour effet de transporter le dirigeable tout entier vers la gauche, c'est-à-dire du côté opposé à la direction que l'on veut prendre. Pendant cette translation, le dirigeable tourne très peu vers la droite (position 2). A ce moment, la rotation s'accentue, la route s'infléchit vers la droite et le ballon effectue son changement de route, le cap étant à l'intérieur de la trajectoire du centre de gravité. Il ne faut pas laisser le gouvernail braqué jusqu'au moment où le dirigeable est dans la nouvelle direction de route, car, le mouvement de rotation ne pouvant être arrêté d'une façon instantanée en raison de l'inertie du dirigeable par rapport à son centre de gravité, la direction voulue serait de beau-

coup dépassée. Aussi remet-on le gouvernail dans la position neutre sitôt que la rotation est franchement amorcée (position 3), mais alors le mouvement peut être continué indéfiniment dans le même sens, comme nous l'avons vu. Il importe donc, arrivé dans la direction voulue, de donner un coup de barre en sens inverse (position 4) pour s'y maintenir.

La permanence de forme. — Dirigeables souples et rigides. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que la permanence de forme de l'enveloppe était réalisée. Deux facteurs interviennent pour la modifier : d'abord la variation du volume lorsque l'aérostat est à des altitudes différentes, ensuite la résistance à l'avancement qui agit violemment sur les parois.

Pour maintenir la permanence de forme dans les ballons dits souples, on utilise uniquement la tension de l'enveloppe due à la pression des gaz de gonflement ; dans les ballons rigides, au contraire, c'est sur une carcasse rigide par elle-même qu'est tendue l'enveloppe du ballon.

Les ballonnets. — Dans la première classe de dirigeables, le volume du gaz qui change sous l'influence de la température ou de la pression, et de plus s'échappe à l'extérieur par osmose à travers la toile, oblige, pour maintenir le plein de l'enveloppe et la pression nécessaire, à refouler de l'air au moyen d'un ventilateur dans des capacités intérieures, des ballonnets dont le gonflement opportun compense la diminution de volume des gaz.

En particulier, le volume d'air introduit doit compenser la contraction du gaz pendant la descente. Si l'altitude maxima que l'on cherche à atteindre est 3 000 mètres, on établit des ballonnets dont le rapport du volume à celui du volume total est d'un tiers environ. Quant aux ventilateurs, ils doivent maintenir le gonflement; pour une

chute rapide, de 5 mètres à la seconde par exemple, leur débit est réglé au 1/1600 de la capacité totale.



Fig. 103. — Parceval allemand.

Toute défaillance dans leur fonctionnement occasionne une perte de pression, le dirigeable devient flasque et la



Fig. 104. — Le dirigeable français *Fleurus*.

permanence de forme, indispensable à la bonne marche et à l'équilibre, est compromise.

Dans les ballons rigides, le gaz est réparti dans 17 ou 18 bal-

lonnets distincts, logés dans une carcasse recouverte d'une enveloppe formant le profil extérieur du dirigeable. Nous n'entrerons pas ici dans la discussion des avantages et des inconvénients que présentent respectivement ces deux systèmes de dirigeables, ni dans leur comparaison qui a donné lieu à de nombreuses polémiques.

En Allemagne il ne faut pas croire que les Zeppelins, les



Fig. 105. — Un dirigeable type Gross.

parfaits exemplaires du rigide, soient les seuls dirigeables construits. Nos ennemis se servent aussi du Parceval (fig. 103) et du Gross-Bassenach (fig. 105), l'un souple, l'autre semi-rigide.

En France et en Angleterre, on a toujours préféré les dirigeables souples (fig. 104). C'est ainsi que les Anglais ont construit de petits dirigeables dont la nacelle est la reproduction à peine agrandie d'un fuselage d'aéroplane. Ajoutons cependant qu'ils avaient construit simultanément, en grand secret, d'énormes superzeppelins rigides.

III

LA GUERRE SOUS-MARINE

LE PROBLÈME DU SOUS-MARIN

Depuis le premier sous-marin de Bushnell en 1776, dont la longueur était de 2 mètres environ et qui était mû à bras d'homme, jusqu'aux grands sous-marins actuels de 1 000 à 2 000 tonnes, le chemin parcouru est énorme. Encore faut-il s'entendre sur le terme même de sous-marins et distinguer ces engins des submersibles de plus en plus répandus.

Dans le sous-marin, la flottabilité, c'est-à-dire la fraction de volume de l'appareil qui, en marche à la surface, émerge, n'atteint pas plus de 5 à 10 p. 100, tandis que, dans les submersibles, elle atteint jusqu'à 40 p. 100. C'est dire que le submersible est un torpilleur pouvant s'immerger et qui, par suite des formes de sa superstructure, peut exécuter dans de bonnes conditions de longs parcours en surface. Le fameux *Deutschland*, au cours de sa traversée d'Europe en Amérique, a sans doute effectué la plus grande partie du trajet en surface, ne s'immergeant qu'au départ et à l'arrivée pour éviter les vaisseaux patrouilleurs.

Sans entrer dans la description, d'ailleurs très connue maintenant, des sous-marins et des submersibles, nous allons essayer de donner quelques indications sur le problème physique qu'ils représentent.

La stabilité des sous-marins. — Étudions d'abord leur stabilité. Il y a lieu de distinguer la stabilité des sous-marins en plongée et celle des sous-marins en surface.

Lorsqu'un corps est complètement immergé, il y a équi-

libre si le poids du corps est égal au poids de l'eau déplacée et si le centre de gravité G se trouve sur la même verticale que le centre de volume ou « centre de carène » C (fig. 106). Pour qu'il y ait équilibre stable, il faut que G soit en dessous de C. Dans ce cas, en effet, si le bâtiment s'incline d'un certain angle sur la verticale, les deux forces P et C donnent lieu à un couple qui tend à ramener le bâtiment à sa position primitive.

Dans le cas d'un corps flottant, les deux premières condi-

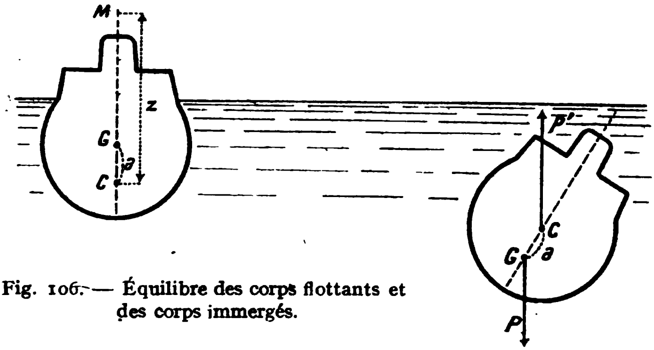


Fig. 106. — Équilibre des corps flottants et des corps immergés.

tions d'équilibre subsistent, mais la condition de stabilité change. En effet, si on incline le bâtiment, son poids reste toujours appliqué au centre de gravité G, mais le point d'application C de la poussée de l'eau, bien que le volume de la carène demeure constant, ne reste pas invariable en position dans le navire, les formes du volume immergé n'étant plus les mêmes. Pour de petites inclinaisons, les diverses poussées passent sensiblement par un même point M situé sur la verticale du centre de carène et appelé *métacentre*. Il suffit, pour que l'équilibre soit stable, que ce point soit au-dessus du centre de gravité.

Si *a* est la distance du centre de gravité au centre de carène C, et si *r* est la distance du métacentre M à C, il faut

que r soit plus grand que a. D'autre part, il ne faut pas que cette quantité soit trop grande, sans quoi le navire a une tendance fâcheuse au roulis.

En effet, la période de roulis d'un bâtiment est donnée par

$$T = \pi \sqrt{\frac{I}{P(r-a)}},$$

I étant son moment d'inertie par rapport à un axe longitudinal passant par le centre de gravité, et P son poids.

Des navires à courte période obéissant immédiatement au couple de roulis se maintiendront perpendiculaires à la lame et l'amplitude des roulis restera aussi égale à l'amplitude des oscillations de la normale à la houle. En général, $r-a$ est de l'ordre de 20 centimètres.

Le rôle des gouvernails. — Comment se fait la plongée

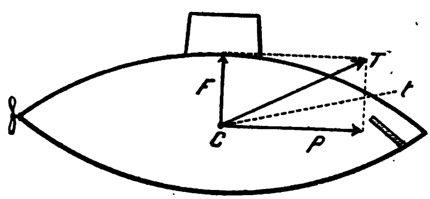


Fig. 107. — Action des gouvernails de plongée.

sous l'action des gouvernails horizontaux ? Considérons un sous-marin prêt à s'enfoncer (fig. 107), et confondons, puisque alors sa flottabilité est très faible, G et C. Il est soumis à deux forces seulement : la poussée de l'hélice P et sa flottabilité positive F. Tout se passera donc comme s'il était tiré par la résultante T, c'est-à-dire qu'il remontera légèrement, son mouvement au départé tant dirigé suivant une direction Ct plus rapprochée de l'axe que la traction CT. En effet, la résistance au déplacement vers le haut est plus grande que celle du mouvement en avant.

Si le bâtiment, au lieu d'être horizontal, a une inclinaison telle que la droite C*t* soit horizontale, le bâtiment continue sa route à immersion constante. Pour arriver à incliner le sous-marin, on se sert de gouvernails horizontaux arrière.

Lorsque le navire est bien réglé, il se tient de lui-même en équilibre en plongée, en effectuant seulement de petites oscillations autour de sa position d'immersion moyenne.

En effet, supposons le sous-marin, qui est incliné (1, fig. 108), écarté en dessous de son plan d'équilibre (2) ; la compression l'alourdit et, sous l'action de cette force, il descend, mais cette

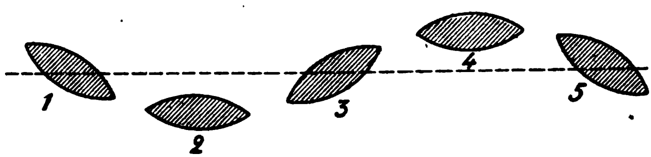


Fig. 108. — Oscillations d'un sous-marin autour de sa position de plongée.

descente en translation oblique relève la pointe (3) et le mouvement de relèvement une fois commencé ne s'arrête pas à la position pour laquelle il y aurait équilibre. Le sous-marin se décomprime alors (4) et, sous l'action de la force verticale introduite, un changement d'inclinaison se produit à nouveau qui ramène le bateau vers une immersion moyenne (5) et les phénomènes se reproduiront indéfiniment.

Naturellement cette stabilité est précaire, et de nombreux appareils automatiques ont été imaginés pour la régulariser.

Le sous-marin fonctionne comme un aéroplane, ou plutôt un hydroplane, renversé. Ses plans produisent, en marche, une légère force verticale vers le bas, de sorte qu'il plonge avec un poids un peu inférieur à celui de la masse d'eau qu'il déplace, donc avec une légère tendance à remonter, qui tend à le ramener automatiquement à la surface dès qu'un arrêt vient annuler la poussée d'enfoncement des ailerons.

La moindre blessure à la coque peut être mortelle. Aux profondeurs où navigue le sous-marin, l'eau pénètre, en raison de sa pression, avec des vitesses considérables : 14 mètres par seconde à 10 mètres de profondeur, 22 mètres par seconde à 25 mètres de profondeur.

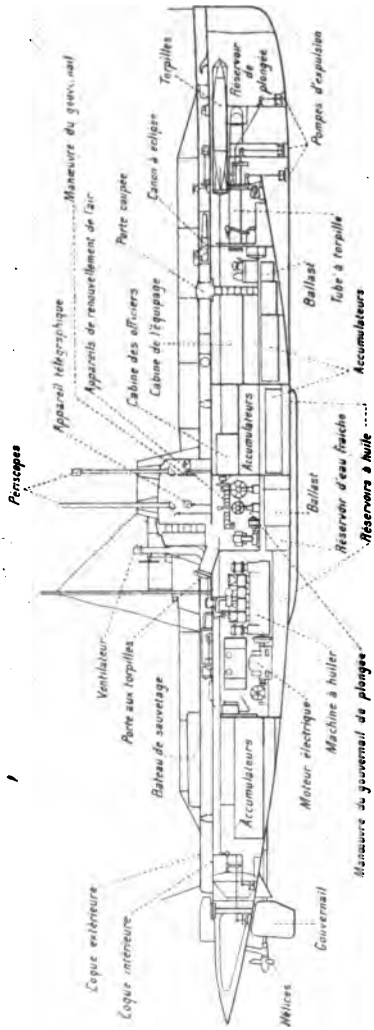


Fig. 109. — Coupe d'un récent sous-marin allemand.

Un simple trou de rivet, ayant une section de 3 centimètres carrés, laisserait entrer de 15 à 25 tonnes à l'heure. Aussi importe-t-il que les pompes d'épuisement soient calculées pour un large débit. Mais le moyen le plus rapide est fourni par les chasses d'air comprimé, qui expulsent brusquement l'eau des ballasts.

Pour que le sous-marin non seulement puisse manœuvrer, mais encore pour qu'il puisse se maintenir en plongée, il faut, comme nous venons de le voir, qu'il ait constamment

recours à sa force motrice. La question du moteur est donc d'une importance primordiale.

Les moteurs du sous-marin. — On a été conduit à employer deux moteurs, l'un pour la marche en surface, l'autre pour la marche en plongée. Le moteur de surface est soit la machine à vapeur des torpilleurs, soit un moteur à combustion interne. Il semble même que la turbine multiple, accouplée avec l'arbre porte-hélices par l'intermédiaire d'engrenages réducteurs du nombre de tours, soit une solution avantageuse, peut-être la seule capable actuellement de fournir la puissance nécessaire aux très grands sous-marins. La turbine développe, à égalité de poids et de volume, plus de puissance que la machine à piston. Son principal inconvénient est sa trop grande vitesse de révolution, incompatible avec le bon rendement des hélices dans l'eau. C'est à quoi remédient les engrenages.

En France, l'emploi des gazolines, des benzols et pétroles lampants ayant été proscrit à la suite des accidents causés par les inflammations des vapeurs de ces corps, on a eu recours au moteur genre Diesel qui brûle des pétroles lourds.

Le moteur Diesel à quatre temps pèse 45 kilogrammes par cheval au lieu de 20 kilogrammes d'une machine à vapeur genre torpilleur, mais il dépense $0^{kg},2$ de combustible en chiffre rond au lieu de $0^{kg},5$; il prend donc l'avantage pour une marche de soixante heures environ, En outre, l'économie totale de place est considérable et, grâce à sa rapidité d'extinction, la plongée du submersible peut se faire dans un moindre délai.

En plongée, le moteur doit fonctionner en vase clos sans absorption d'air, sans production à l'intérieur des bateaux de gaz irrespirables, sans odeurs nuisibles, sans bruit qui troubleraient les transmissions des ordres et décéleraient la présence du sous-marin. Le moteur électrique à accumula-

teurs fournit la solution immédiate, mais imparfaite.

Lourds et encombrants, les accumulateurs pèsent au



Fig. 110. — La salle des machines d'un sous-marin.

minimum 80 kilogrammes par kilowatt, tandis qu'une chaudière à vapeur ne pèse que 10 kilogrammes. Ils ne débitent qu'un cheval-heure au plus par 30 kilogrammes ; et le poids d'accumulateurs correspondant à un kilowatt pendant vingt-quatre heures est de 1 000 kilogrammes, soit 750 par cheval.

La charge s'effectue pendant la marche en surface aux dépens de la machine motrice. L'énergie accumulée ne permet qu'une marche de une heure environ à la vitesse maximum qui ne dépasse guère 12 nœuds. Pour marcher à 6 nœuds, la dépense horaire d'électricité est huit fois moindre et le rendement des accumulateurs presque le double, de sorte que l'on peut alors rester seize heures sous l'eau. On peut donc disposer, pour l'attaque, de une demi-heure à 12 nœuds,

et de huit heures à 6 nœuds pour déjouer la poursuite.
Diverses tentatives ont été faites pour s'affranchir des

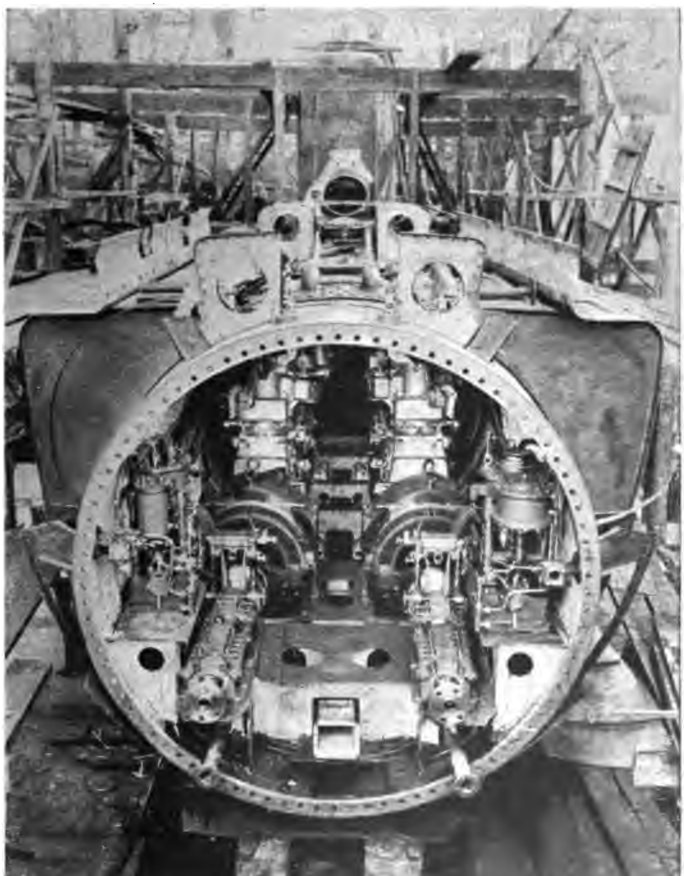


Fig. 111. — Intérieur du sous-marin Cage.

inconvénients des accumulateurs. Avec le moteur Diesel, il faudrait se débarrasser sous l'eau des gaz de la combus-

tion sans produire de sillage apparent à la surface. A ce point de vue, le combustible idéal serait l'hydrogène brûlant dans l'oxygène. Il se forme uniquement de l'eau, que l'on condenserait. Des études ont été entreprises dans ce sens par MM. de Mondésir et Schlœsing. On a aussi proposé de revenir à la marche à l'air comprimé, inaugurée il y a un demi-siècle. Un des cylindres du moteur Diesel fonctionne constamment comme pompe et comprime de l'air dans des réservoirs pendant la marche en surface. Ensuite, sous l'eau le moteur est actionné par l'air comprimé. La suppression qui résulte de l'échappement de l'air dans l'intérieur du sous-marin n'est pas dangereuse et est très bien supportée par l'équipage.

LA TORPILLE

Si une torpille est un petit sous-marin, suivant la formule consacrée, c'est un sous-marin bien plus compliqué que l'autre, car, privé du cerveau directeur et des volontés agissantes qui à chaque instant redressent la marche du bâtiment, il doit porter en lui-même non seulement les organes moteurs, mais aussi les dispositifs mécaniques réglant automatiquement sa marche.

Extérieurement la torpille se présente sous la forme d'un corps cylindrique terminé à l'avant par une surface sensiblement hémisphérique et à l'arrière par une surface conique beaucoup plus effilée, prolongée elle-même par une queue (gouvernails et hélices).

Au point de vue de son organisation intérieure, elle comprend, de l'avant à l'arrière : le cône de charge amovible — qui, dans les torpilles de 450 millimètres dont la longueur est de 6 mètres et le poids de 700 kilogrammes, renferme 100 à 120 kilogrammes de fulmicoton, — le réservoir d'air et le mécanisme.

Le moteur à air comprimé. — Dans le réservoir l'air est comprimé à une pression de 150 kilogrammes par centimètre carré.

En sortant du réservoir, l'air, ramené à une pression de 37 à 38 kilogrammes par centimètre carré, est considérablement refroidi par la détente. Sa température est souvent inférieure à zéro degré. Avant de l'envoyer au moteur, on élève sa température dans un appareil spécial, le réchauffeur, de façon à éviter que les lubrifiants ne gèlent — ce qui produirait des désordres fâcheux — et en même temps accroître le rendement du moteur. Dans cet appareil sont injectés un combustible liquide (on emploie de l'alcool, du pétrole ou de l'essence) et de l'eau douce finement divisée. Le réchauffage par le combustible liquide porte la température de l'air aux environs de 300°, et l'injection d'eau pulvérisée ramène cette température à 200°.

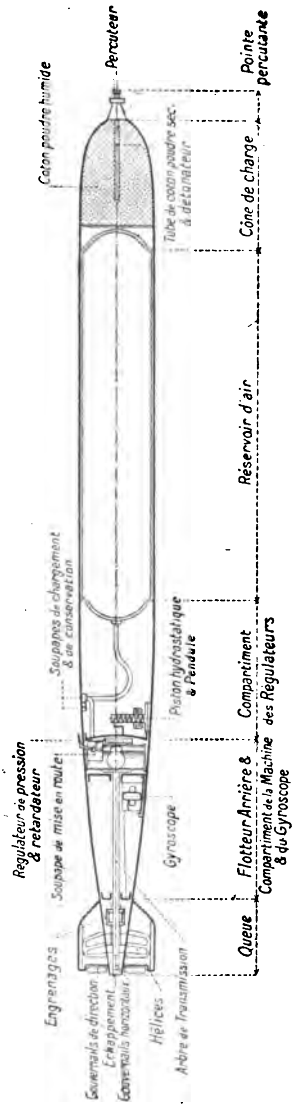


Fig. 112. — Coupe schématique d'une torpille.

Le réchauffage de l'air et la vaporisation d'eau pulvérisée, d'application récente, ont beaucoup amélioré le rendement et ils ont augmenté, dans des proportions notables, la

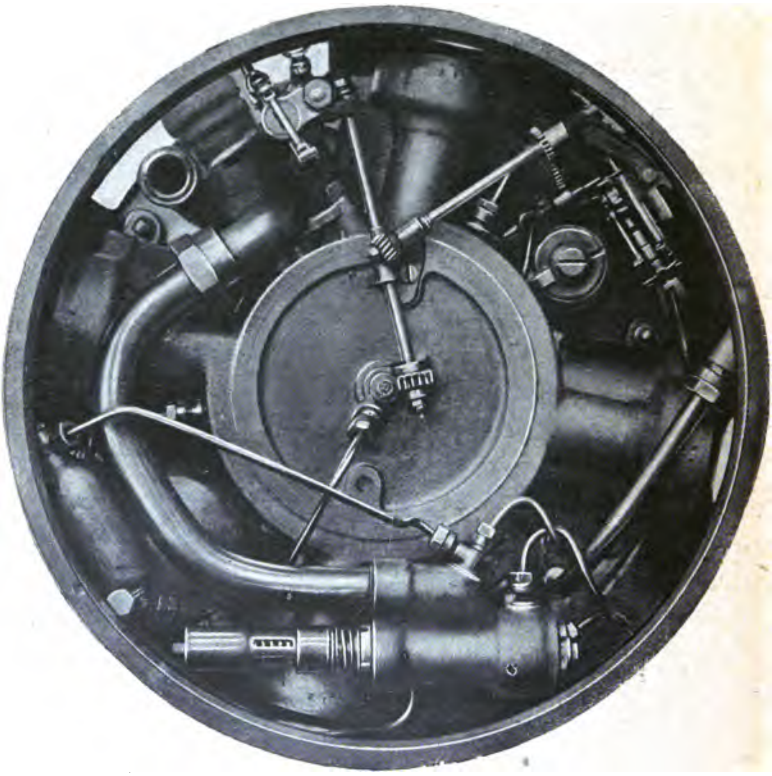


Fig. 113. — Vue intérieure d'un moteur à air de torpille.

vitesse et la portée des torpilles, de la même façon que la surchauffe a considérablement augmenté la puissance des machines à vapeur.

Voici, à titre d'indication, quelques chiffres montrant

l'accroissement des vitesses obtenues en employant le réchauffeur d'air. Il s'agit là d'une torpille de 457 millimètres de diamètre.

	Air non réchauffé.	Air chaud.
A 1 000 mètres.	35 nœuds.	43 nœuds.
1 500 —	30 —	40 —
2 000 —	28-25 —	38 —
3 000 —	23-24 —	32 —
4 000 —	18-20 —	28 —

Le réchauffeur et les réservoirs d'eau et de combustible liquide qui l'alimentent font partie des organes logés dans la partie arrière de la torpille.

Cette partie arrière, très complexe, est divisée en plusieurs compartiments : compartiment étanche des régulateurs, compartiment de la machine motrice, compartiment étanche du flotteur arrière et du gyroscope. A la suite de ce dernier compartiment, se trouve le cadre de la queue de la torpille. La machine motrice est un moteur à quatre cylindres opposés deux à deux, qui commande l'arbre axial des hélices qui est creux et sert à l'échappement du gaz venant des cylindres.

Les hélices sont au nombre de deux et tournent en sens inverse ; l'une d'elles est calée directement sur l'arbre moteur, l'autre, montée sur un tube concentrique à cet arbre, est actionnée par l'intermédiaire de pignons dentés. La rotation en sens contraire des deux hélices, dont la vitesse est égale, a pour but d'éviter tout mouvement de rotation de la torpille autour de son axe, mouvement qui tendrait forcément à se produire avec une seule hélice.

La direction de la torpille. — Le réglage de la profondeur d'immersion est indispensable pour assurer les effets de l'explosion par éclatement sous une colonne d'eau, de 3 mètres environ, formant « bourrage », et pour obtenir le rayon d'action maximum

Le régulateur d'immersion et d'assiette est constitué par un piston hydrostatique, un pendule et un servo-moteur.

Le piston en communication avec la mer est équilibré par des ressorts antagonistes. Si la torpille plonge, la pression de l'eau comprime les ressorts et déplace le piston, qui

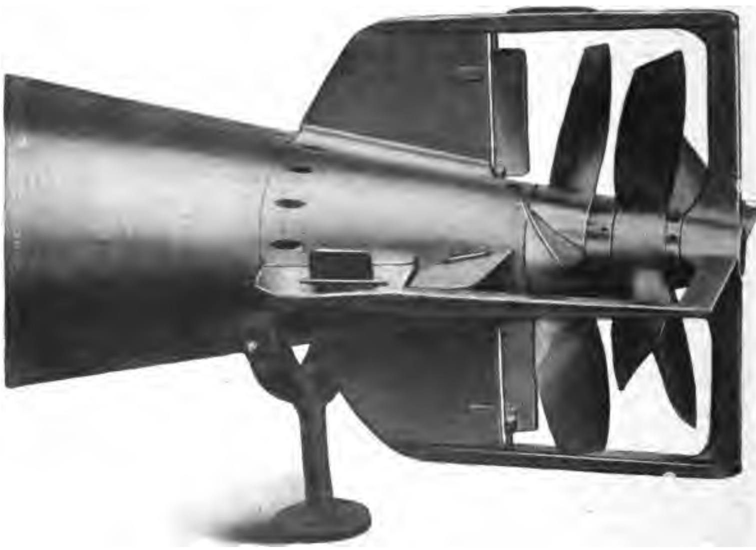


Fig. 114. — Vue arrière d'une torpille montrant les deux hélices tournant en sens inverse et les gouvernails de direction.

est relié aux gouvernails horizontaux de profondeur, dont l'inclinaison est changée. Le pendule vertical sert à réduire aussi les oscillations de la torpille. Comme la force de déplacement de ces organes, piston et pendule, est faible, — quelques grammes, — on interpose entre eux et les gouvernails un servo-moteur qui développe la force de 30 kilogrammes environ nécessaire pour la manœuvre de ces derniers.

La rectitude de la trajectoire est obtenue par l'emploi d'un gyroscope mû par une turbine à air comprimé qui

agit sur le gouvernail de direction et ramène toujours l'axe de la torpille sur la direction qui lui a été donnée au départ.

Au moment du lancement, l'axe du gyroscope, jusqu'alors fixé dans une position parallèle à l'axe de la torpille, est libéré ; en vertu des propriétés mécaniques des corps tournant à grande vitesse (3 600 tours à la minute) autour d'un axe, sa direction reste invariable dans l'espace, quels que soient les déplacements des deux cercles mobiles constituant sa suspension à la Cardan.

Un tiroir à air et un piston commandant les gouvernails assurent la dépendance des variations angulaires de l'axe du gyroscope autour de l'axe vertical de la torpille.

Ajoutons, pour terminer, que le rayon d'action varie de 1 000 mètres à une vitesse de 22 mètres à la seconde (43 nœuds) pour les torpilles à grande vitesse, à 8 000 ou 9 000 mètres à une vitesse de 14,50 à la seconde (28 nœuds) pour les torpilles à petite vitesse.

La force vive des torpilles à grande vitesse, qui atteint 170 000 kilogrammètres, leur permet dans bien des cas de traverser la coque des navires avant d'exploser, ce qui augmente leur efficacité.

IV

LA BALISTIQUE

LA TRAJECTOIRE DES PROJECTILES

L'étude de la trajectoire des projectiles et la confection des « tables de tir » donnant, pour chaque obus, les distances de chute en fonction de l'angle de tir et de la charge, constituent le problème principal de la balistique extérieure, la balistique intérieure étudiant plus spécialement le trajet du projectile dans l'âme du canon, les effets des poudres sur le métal, le recul de la pièce, le calcul des affûts et des freins, etc.

La détermination des trajectoires peut évidemment se faire expérimentalement, et c'est ainsi que l'on a procédé pendant fort longtemps. Mais l'emploi des poudres modernes se généralisant, les documents et les expériences étant de plus en plus abondants, on a pu chercher à synthétiser en des lois toutes les données accumulées par les commissions d'expériences et la science de la balistique se développa. Parmi les savants artilleurs qui ont contribué à son perfectionnement et publié des mémoires fondamentaux, nous citerons en France le général Sébert, le colonel Charbonnier, et en Italie le capitaine Siacchi.

Le calcul est, tout au moins théoriquement, très simple. Le projectile est soumis à trois forces : la force propulsive de la poudre, son poids et une force antagoniste due à la résistance de l'air (1) (nous négligerons les forces secondaires,

(1) La grandeur de la résistance de l'air est considérable, puisqu'elle

comme celles provenant de la rotation du projectile). Mais la question se complique lorsque l'on cherche à déterminer cette résistance. Les expériences sur l'action de l'air sur les corps en mouvement, d'ailleurs toutes récentes, si elles ont fourni des résultats fondamentaux en aviation, n'ont jamais pu être poussées jusqu'aux vitesses de plusieurs centaines de mètres par seconde, qui sont courantes en artillerie. Il a fallu opérer expérimentalement et déduire les lois de l'observation des tirs de canons de tous calibres. Connaissant ces lois, on peut alors reprendre le calcul et établir avec précision les trajectoires des obus nouveaux. Aussi allons-nous donner quelques indications sur les lois de la résistance de l'air aux grandes vitesses, ce qui nous permettra de définir certains termes couramment employés en artillerie.

Cet exposé sera fait suivant les idées classiques admises par les balisticiens. Nous avons vu, en parlant de la résistance de l'air, que les données expérimentales, jusqu'à ces derniers temps, faisaient absolument défaut. Les lois de résistance admises dans le calcul sont nettement fausses, malgré la précision illusoire que semblent avoir les valeurs numériques qu'on attribue aux coefficients. Tout l'édifice de la balistique extérieure est donc ébranlé, il faut le reconstruire sur de

correspond, pour un obus étudié par Gibert, aux valeurs suivantes en fonction de la vitesse :

Vitesse en mètres.	Résistance en kg par cm².	Puissance en chevaux.
400	1,25	6,5
800	6,23	65
1 000	10,15	130
1 200	15,01	240

La troisième colonne donne la puissance en chevaux qu'il faut développer pour vaincre cette résistance (c'est-à-dire pour repousser, par exemple, une force de 1kg,25 de 400 mètres par seconde dans sa direction). On voit quel frein puissant oppose l'air au déplacement des obus.

nouvelles bases et ce travail formidable est à peine commencé.

Aussi, pendant de longues années encore, les calculs de trajectoire des projectiles seront-ils faits, comme par le passé, suivant les anciennes hypothèses, et c'est pourquoi nous avons cru devoir les résumer ici.

La résistance de l'air aux grandes vitesses. — Comme pour les faibles vitesses, la résistance de l'air est proportionnelle

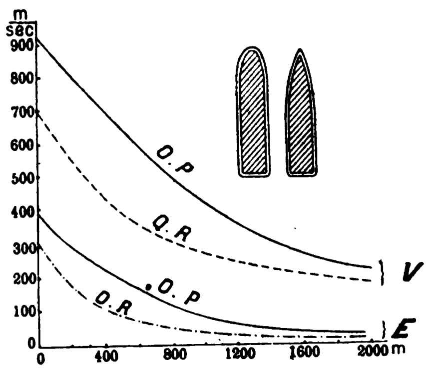


Fig. 115. — Variation de la vitesse ou fonction de la portée suivant que l'obus est à ogive pointue ou ronde.

à la densité de l'air, à la section droite du projectile (ou au carré du calibre) et est une certaine fonction de la vitesse, fonction qu'il s'agit de déterminer et qui d'ailleurs dépend de la forme et des dimensions du projectile.

S'il fallait, pour chaque obus, recourir à l'expérience pour déterminer cette fonction de la vitesse, il serait impossible d'établir un projet de matériel d'artillerie et de prévoir les conditions de fonctionnement d'un obus de caractéristiques données.

Mais Siacchi a trouvé que la fonction de vitesse pouvait être considérée, pour un obus particulier, comme proportionnelle à une fonction type, la même pour tous les projectiles

de forme voisine, le coefficient de proportionnalité étant appelé l'*indice caractéristique* I de l'obus. Naturellement cette loi n'est qu'approchée, aussi ne s'applique-t-elle qu'à de faibles variations de forme, et il serait illusoire de l'utiliser pour passer des projectiles oblongs, par exemple, aux projectiles sphériques.

Si nous traduisons par une formule les lois que nous venons d'énoncer, nous trouvons que la résistance de l'air R se présente sous la forme

$$R = -\frac{\Delta a^2 i}{p} f(v),$$

Δ étant la densité de l'air, a le calibre de l'obus, p son poids, i son indice caractéristique et $f(v)$ la fonction type de la vitesse. On appelle *coefficient balistique* l'inverse de la quantité qui multiplie $f(v)$ dans cette formule.

Le coefficient balistique. — L'importance de ce coefficient est la suivante : des projectiles lancés avec la même vitesse initiale ont encore des vitesses égales après des parcours proportionnels à leurs coefficients balistiques.

On voit donc que l'on a intérêt à augmenter autant que possible ce coefficient balistique, et pour cela agir, dans le sens convenable, sur les facteurs qui le constituent. On augmentera le calibre, la masse (en allongeant le projectile et en le constituant avec des métaux lourds), et on diminuera l'indice de forme, comme on l'a fait dans la balle D (1).

(1) Voici quelques valeurs usuelles du coefficient balistique :

Balle de shrapnell de 10 grammes	0,034
Balles rondes	0,17
— ordinaires	0,28
Balle D française	0,445
— S allemande	0,7
Obus de 75	1,6
— de 305	7

Si nous supposons quatre projectiles, un 305, un 75, un boulet rond et

Les fonctions de vitesse. — Le problème se trouve donc ramené à la détermination de la fonction type de vitesse $f(v)$.

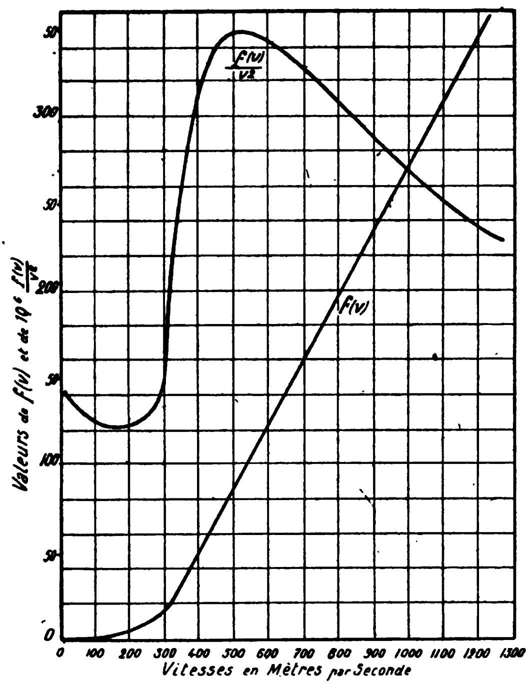


Fig. 116. — Courbe représentative de la fonction de vitesse.

Au lieu de considérer cette fonction elle-même, on a choisi une fonction auxiliaire, qui donne une courbe variant plus

une balle de shrapnell de 10 grammes, lancés à la même vitesse initiale de 800 mètres, ils auront la même vitesse, par exemple 576 mètres à la seconde, après des parcours respectifs de 7 000, 1 600, 170 et 34 mètres ! Au bout de 500 mètres de trajectoire leurs vitesses seront respectivement de 782, 725, 314 et 72 mètres et leurs portées maximum, sous un angle de tir de 5°, seront 8 500, 5 000, 1 560 et 550 mètres (d'après Charbonnier, *Balistique extérieure*).

lentement et par suite plus facile à étudier. Cette fonction auxiliaire est $\frac{f(v)}{v^2}$.

La figure 116 reproduit cette courbe et la courbe $f(v)$ d'après les expériences de la commission de Gavres. La courbe auxiliaire présente un minimum pour la vitesse de 180 mètres par seconde, un maximum pour la vitesse de 480 mètres, et en outre elle présente une certaine symétrie par rapport au point correspondant à une vitesse très approximativement égale à celle du son dans l'air (330 mètres par seconde).

Un grand nombre de formules ont été proposées pour représenter cette fonction de vitesse, mais aucune n'est applicable pour toutes les vitesses et, lorsqu'on calcule une trajectoire, on est conduit à employer chacune d'elles dans les limites où elle est valable, et à raccorder ensuite les courbes.

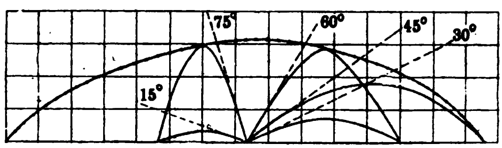


Fig. 117. — Les trajectoires des projectiles tirés sous des angles différents et la courbe enveloppe, dite courbe de sécurité, que l'obus ne peut dépasser.

Forme de la trajectoire. — Nous n'entrerons pas dans de plus amples détails sur le problème balistique extérieur, priant le lecteur de nous pardonner un exposé aussi succinct d'une question aussi complexe. Donnons seulement les résultats généraux applicables à tous les projectiles.

La trajectoire, dont la forme générale est représentée figure 115, a une asymptote verticale qu'elle n'atteint qu'au

bout d'un temps infini. La vitesse horizontale du projectile v décroît d'une façon continue au fur et à mesure que le projectile s'éloigne du canon. La vitesse tangentielle, c'est-à-dire la vitesse du projectile sur sa trajectoire, décroît constamment jusqu'en un point M situé au delà du sommet

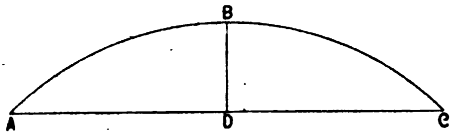
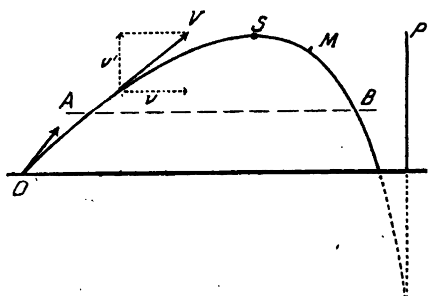


Fig. 118. — Trajectoire théorique d'un projectile dans le vide.

sur la branche descendante. Elle passe alors par un minimum et croît ensuite en tendant vers une valeur finie qu'on appelle la vitesse limite. Quant à la composante verticale de



— La forme de la trajectoire d'un projectile dans l'air.

la vitesse, elle décroît d'abord, s'annule au sommet et tend ensuite vers la vitesse limite.

Pour deux points A et B situés sur une même horizontale, la durée du trajet entre le sommet S et B est plus grande que la durée du trajet de A à S. Ce résultat est applicable en particulier à l'origine et au point d'impact,

LE TIR A TRÈS GRANDE DISTANCE

Pour donner une idée de la grandeur de la portée, il nous suffira de dire que le canon de 75 pointé sous un angle de 25° tirant à 535 mètres de vitesse initiale, et qui, dans le vide, comme nous l'avons vu, porterait à 22 kilomètres, voit sa distance de tir tomber dans l'air à 8 500 mètres dans les mêmes conditions (fig. 120). La trajectoire réelle est en général en dessous de la trajectoire dans le vide.

Il est cependant des cas, lorsqu'il s'agit de pièces de gros calibres tirant dans certaines conditions, où l'on peut

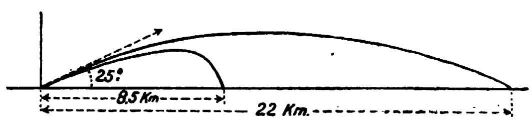


Fig. 120. — La trajectoire dans le vide et la trajectoire correspondante dans l'air d'un obus de 75.

observer que la portée est supérieure à la portée dans le vide et correspond à un angle de tir supérieur à 45°.

Influence de la densité de l'atmosphère. — Dans le vide, pour lancer un projectile à 120 kilomètres sous l'angle optimum de 45° il faut lui communiquer une vitesse initiale de 1 100 mètres par seconde, et la flèche atteint 30 kilomètres. La durée du trajet serait de 2′30″. Dans l'air, d'après ce que nous savons, pour arriver au même résultat, il faudrait, peut-on croire, augmenter énormément la vitesse initiale. Or, il n'en est rien et voici pourquoi. Tous nos calculs précédents supposent une résistance énorme de la part de l'air, mais n'oublions pas que l'atmosphère est de plus en plus ténue au fur et à mesure qu'on s'élève. A 5 000 mètres la pression, par suite la densité et la résistance, sont déjà réduites de moitié. A 15 000 mètres, elles doivent être sensiblement nulles.

Pour la partie de sa trajectoire située au-dessus de cette altitude, tout se passe pour le projectile comme s'il se déplaçait dans le vide, et, par conséquent, si nous avons tiré sous un angle supérieur à 45°, voisin par exemple de 50 ou 52° tel que l'obus aborde la région du vide sous un angle de 45°, il y effectuera son parcours maximum. On conçoit donc que l'augmentation de vitesse à lui communiquer ne sera pas si grande qu'on pouvait le croire *a priori*, elle n'a pour but que de compenser la résistance de l'air sur *une partie seulement* de la trajectoire. Pratiquement la vitesse initiale doit être de l'ordre de 1 460 mètres par seconde.

Remarquons que l'état hygrométrique de l'air a une importance considérable sur la portée d'un canon lorsque celui-ci tire à des distances aussi grandes.

En effet, la résistance de l'air est, comme nous l'avons vu, fonction de la densité de l'atmosphère dans lequel se meut l'obus. Or, si l'air est surchargé d'humidité, sa densité augmente notablement et par suite la portée est réduite. On est forcé de faire, lorsqu'il s'agit du tir des pièces de calibre supérieur au 155 pour des distances supérieures à 10 000 mètres, une correction pour tenir compte de cette variation. On conçoit facilement la grandeur de l'écart en portée qui peut en résulter lorsque la distance de tir atteint 120 kilomètres.

En résumé, on voit donc que plus la portée sera grande, moins l'augmentation de vitesse initiale sera considérable, puisqu'alors la plus grande partie de la trajectoire sera effectuée dans les régions privées d'atmosphère et où la résistance de l'air n'intervient plus. Sans compter qu'à ces altitudes, la pesanteur qui tend à ramener le projectile vers le sol et détermine la courbure de sa trajectoire est aussi plus faible qu'à la surface du sol, circonstance qui allonge encore la portée.

Ces résultats n'ont pas été sans surprendre les balisticiens classiques et les faire douter de l'exactitude des formules admises pour la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude. La formule de Laplace n'est qu'une formule mathématique établie pour une masse homogène de gaz et une loi donnée de variations de la température. Concorde-t-elle avec la réalité? Si curieux que cela puisse paraître, on n'en sait rien, et cependant sa connaissance exacte serait non seulement utile en artillerie, mais encore en aviation. Peut-être un jour les météorologistes et les physiciens se mettront-ils d'accord.



Fig. 121. — Le canon retubé sur une partie de sa longueur réalisant ainsi un nouveau canon à très grande chambre à poudre et à grande longueur en calibres.

Réalisation d'une Bertha. — Le problème pratique revient donc à réaliser une vitesse initiale de 1500 mètres environ. Pour arriver à la solution, les Allemands n'ont pas construit de canons gigantesques, comme on l'avait cru tout d'abord; ils ont simplement modifié les canons de marine, inutiles sur des navires qui n'ont jamais eu l'intention de combattre, de façon à réaliser une pièce ayant une très grande chambre

à poudre par l'opération du *tubage* sur la longueur de l'arme seule, comme l'indique la figure 121.

Dans ces conditions, la chambre a de grandes dimensions ; de plus la longueur du nouveau canon par rapport à son calibre est considérable, ce qui permet la meilleure utilisation de la poudre.

Prenons un exemple, très voisin sans doute de la réalité. Un 380 de marine Krupp a 19 mètres de longueur, soit 50 calibres. Introduisons à l'intérieur par frettage un tube réduisant le calibre à 210 par exemple, le rapport de la longueur (19 mètres) au nouveau calibre passe alors à 90. Si le tubage ramène le calibre à 120, le rapport atteint 150. La chambre à poudre étant restée la même, l'action des gaz est plus énergique et s'exerce pendant tout le parcours du projectile dans le canon, sans diminution notable de pression : la vitesse initiale dans ces conditions peut atteindre la valeur de 1500 mètres nécessaire pour tirer à 120 kilomètres.

LA PHOTOGRAPHIE DES PROJECTILES EN MOUVEMENT

Les phénomènes qui accompagnent le déplacement rapide des corps dans l'air sont des plus singuliers ; leur étude physique fournit d'intéressantes conclusions et étend le domaine des connaissances aérodynamiques sur la résistance de l'air. C'est Mach qui, en 1887, photographia le premier les projectiles en mouvement, mettant en évidence les ondes aériennes qui l'accompagnent. Ses études furent très remarquées, et en France quelques artilleurs, les capitaines Journée, de Labouret et Souchier, travaillant la même question, découvrirent un singulier phénomène qu'ils énoncèrent en disant que les projectiles à grande vitesse *transportent*

l'explosion. En fait, un projectile dont la vitesse est supérieure à celle du son produit à son passage un claquement sec, que l'on peut assimiler à un éclatement et qui est ce qu'on appelle l'« *onde de choc* ».

Disons d'abord quelques mots du dispositif employé pour faire les photographies.

Dispositif d'observation photographique. — Dans le circuit réunissant les armatures d'une bouteille de Leyde F

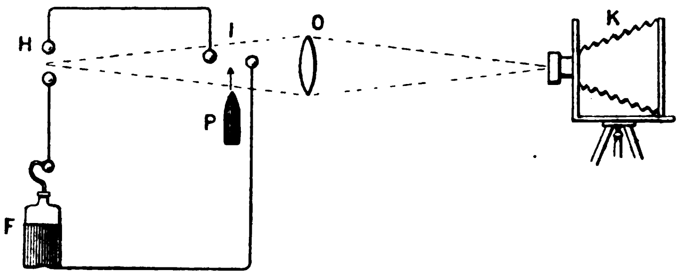


Fig. 122. — Disposition de la chambre photographique K et du circuit électrique ; F, bouteille de Leyde ; H, éclateur ; P, projectile ; O, lentille ; I, circuit.

se trouvent disposés deux interrupteurs I et H. En I les électrodes se composent de fils métalliques (fig. 122) enfermés dans de petits tubes de verre. Le projectile P, en passant par l'intervalle I, brise les tubes et produit la décharge électrique à la fois aux points I et H. L'étincelle H, en partie masquée par un écran, éclaire le projectile devant la lentille O et détermine, au foyer de l'objectif d'une chambre photographique K, une image qui peut être totalement ou partiellement masquée. Grâce à cet éclairage instantané produit par le projectile lui-même, au moment convenable, on obtiendra une épreuve sur laquelle seront figurées, avec le projectile, les électrodes, l'étincelle I et les variations de densité de l'air environnant.

Supposons, en effet, qu'en H soit un point lumineux dont les rayons arrivent sur la lentille O; la distance HO étant supposée supérieure à la distance focale, ces rayons traversent la lentille et vont converger pour donner une image du point d'émission, et diverger ensuite dans toutes les directions. C'est la marche des rayons lumineux dans les circonstances ordinaires. Mais si, sur le trajet de ces rayons, soit entre H et la lentille, soit à l'intérieur de celle-ci, soit entre la lentille et l'image, il se trouve un obstacle qui oblige une partie des rayons à suivre un autre chemin, on a alors, outre les rayons qui suivent le chemin précédent, d'autres rayons suivant un autre trajet et venant pour ainsi dire signaler l'existence de l'obstacle interposé sur leur route. On se trouve ainsi en présence de rayons réguliers et de rayons irréguliers. Pour les séparer, il suffit de glisser, en avant de l'appareil photographique, un écran opaque de manière à arrêter directement les rayons réguliers et à laisser les rayons irréguliers continuer leur route le long du bord de l'écran.

Le sillage des projectiles. — Les résultats des expériences peuvent se résumer ainsi :

1° Il existe en avant du projectile une condensation d'air qu'il est possible de rendre visible, mais il faut pour cela que la vitesse de la balle dépasse la vitesse du son, soit 340 mètres environ par seconde.

2° Si le projectile a une vitesse suffisante, la limite de la région de condensation de l'air en avant du projectile apparaît sous la forme d'un cône épaissi à la pointe, enveloppant la balle, ayant son sommet devant la pointe et l'axe suivant la trajectoire. Des lignes de séparation semblables, mais de forme rectiligne, partent du corps de la balle et divergent vers l'arrière symétriquement par rapport à la trajectoire (fig. 123 et 124).

Des expériences plus récentes ont montré que l'onde condensée en avant de la balle jouissait de propriétés singulières. En photographiant une balle à quelques millimètres

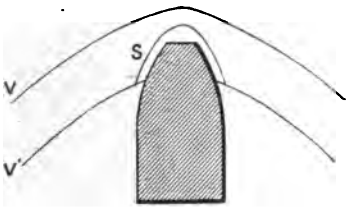


Fig. 123. — Forme de l'onde VV' produite par un projectile; S, gaine d'air entraînée.

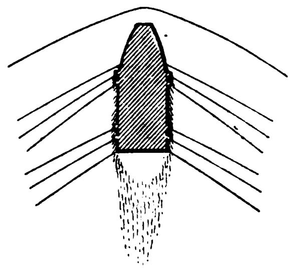


Fig. 124. — Le sillage aérien d'un projectile.

en avant d'une plaque de verre contre laquelle elle était tirée, on a pu constater que déjà le verre volait en éclats avant d'être heurté par la balle. C'est donc à la condensation d'air en avant de sa pointe qu'il faut attribuer ce résultat.

De même une balle tirée à très grande vitesse contre un mouchoir suspendu par deux coins ne le traverse pas, le linge étant en quelque sorte soufflé par l'onde gazeuse que le projectile pousse en avant de lui.

3° Avec les balles animées de grande vitesse, le canal qu'elles laissent derrière elles est rempli par de petits nuages d'aspect tout particulier. Ils sont à peu près réguliers et symétriques et ressemblent à des perles enfilées sur un cordeau tendu le long de la trajectoire.

Expériences de Mach. — Les résultats obtenus avec les balles de fusil furent étendus ensuite par Mach et Salcher aux projectiles d'artillerie de 40 et de 90, moyennant une légère modification : pour se mettre à l'abri de la lumière

directe, tout l'ensemble était placé dans un tube de tôle ; un courant électrique déterminait l'ouverture de la chambre photographique. Cette ouverture produisait la fermeture d'un second courant qui faisait partir le coup. Le passage

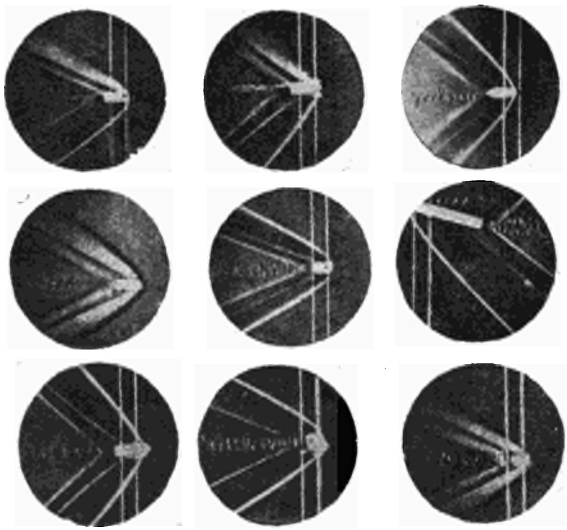


Fig. 125. — 1 et 2. Sillage d'une balle en aluminium, à la vitesse de 700 m. — 3 et 4. Balle pointue en laiton, vitesse 520 m. — 5. Balle cylindrique en laiton, vitesse 520 m. — 6. Balle allongée en aluminium déviée accidentellement de la ligne de tir, deux séries de tourbillons. — 7, 8 et 9. Balle cylindrique en aluminium, vitesse 900 m.

du projectile entre les fils déterminait la rupture du premier circuit et par suite l'obturateur retombait.

Les clichés obtenus montrèrent l'onde de tête comme une bande assez large de forme hyperbolique, avec l'origine un peu plus en avant de la pointe du projectile que dans les balles de fusil. On remarqua aussi une couche d'air particulière S formant au projectile une sorte de proue (fig. 125). D'autres ondes partent du corps des projectiles. Dans le

cas étudié, on en remarquait trois légèrement divergentes partant des cordons avant et trois autres partant des cordons arrière et formant avec l'axe du projectile des angles plus ouverts que les premières. On serait tenté d'attribuer ces ondes à la présence des cordons, mais on les a observées également dans le cas de projectiles à parois lisses.

Quant aux tourbillons à l'arrière du projectile, ils présentent des stries longitudinales qui font paraître l'obus comme terminé par un plumet.

Les photographies ont aussi permis de mettre en évidence l'existence d'ondes condensées et d'ondes dilatées. C'est ainsi que l'onde condensée de tête est suivie d'une onde dilatée. On n'a jamais pu observer de vide derrière les projectiles, même tirés à des vitesse de 900 mètres par seconde, alors que la vitesse d'affluence de l'air dans les conditions de l'expérience n'est que de 700 ou 800 mètres.

L'onde de choc. — Le fait qui ressort immédiatement des expériences entreprises avec des armes tirant à des vitesses supérieures à celle du son est, dit le capitaine Journée dans un mémoire présenté à l'Académie des Sciences, qu'un observateur placé derrière une cible entend simultanément un claquement produit par la balle et le choc de la balle contre la cible tant que la distance de cette cible à l'arme ne dépasse pas une certaine limite. Le capitaine Journée avait vu que le projectile « empoıtait le son ». Au delà de cette limite, la détonation précède le choc d'un temps d'autant plus grand que la distançe est plus considérable. Le capitaine Labouret reprit les expériences et la théorie du capitaine Journée; l'ensemble de ces travaux fit l'objet d'une communication du colonel Sébert en 1888 à la Société française de physique, sur le projectile considéré comme instrument sonore.

Mach et Mappen reprirent expérimentalement l'étude de

l'« onde de choc » émise par tout projectile dont la vitesse est supérieure à celle du son. Pour ces auteurs, la couche d'air qui se trouve en avant du projectile ne peut plus s'enfuir lorsque la vitesse dépasse celle du son, elle doit supporter la condensation et la pression produite par le mouvement

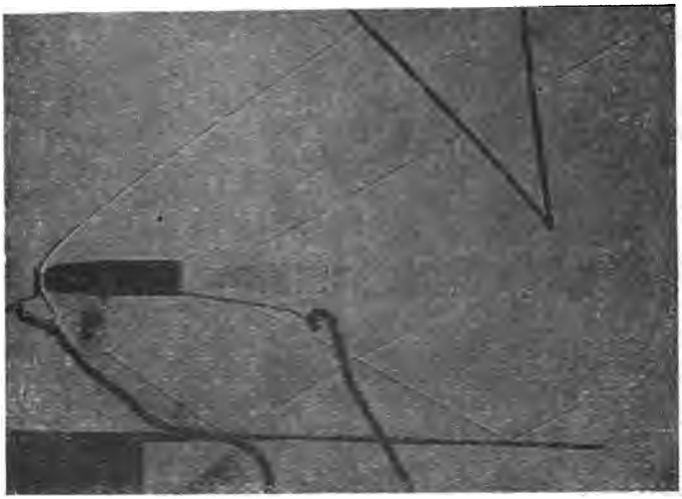


Fig. 126. — Balle de fusil prise au vol (photographie de M. C.-V. Boys). La balle, touchant deux fils de plomb, provoque l'éclatement d'une étincelle, qui projette sur la plaque photographique, en même temps que l'image de la balle, celle des ondes aériennes qu'elle engendre par son passage.

du corps, et l'onde prend la forme représentée sur le schéma (fig. 126). C'est une onde du même genre qu'on observe dans le cas d'un vaisseau, c'est encore la même onde qui se forme contre une pile de pont. Cette onde est unique et l'observateur, au moment où l'onde l'atteint, perçoit un choc analogue à celui d'une détonation.

Ainsi donc un projectile se déplaçant avec une vitesse supérieure à celle du son révèle sa présence en un point donné de l'espace, avant que l'ébranlement déterminé dans l'air

en un point antérieur de la trajectoire ait pu rejoindre le projectile. Ces dernières ondes arriveront donc plus tard et on croira entendre un projectile siffler en retournant vers l'arme dont il est issu.

Le claquement, que l'on prend parfois pour une explosion, s'observe aussi dans les bolides qui traversent l'atmosphère à grande vitesse et semblent pour les observateurs exploser au-dessus de leur tête. L'échauffement des bolides qui les porte à l'incandescence est dû à la compression de l'air en avant d'eux, compression qui, comme l'expérience classique du briquet à air le montre, s'accompagne d'un dégagement de chaleur intense, et non pas au frottement pur et simple du bolide sur l'air.

En 1888 et 1890, au moment où se poursuivaient les études que nous venons de résumer très brièvement, l'aviation n'existait pas et la résistance de l'air était mal connue. Il suffit, pour s'en convaincre, de regarder les photographies représentant les sillages laissés dans l'air par les projectiles pour s'apercevoir que les artilleurs qui ont déterminé la forme de ces obus ne se sont pas assez préoccupés de faciliter leur pénétration dans l'air. Or, cette résistance à l'avancement qu'éprouve un projectile est la cause principale qui limite sa portée qui dans le vide, pour une balle de fusil, serait de 60 kilomètres. Dans une étude récente, M. de Sparre a montré que, pour une pièce de marine tirant sous grand angle, l'augmentation de portée due au seul fait qu'une partie de la trajectoire est dans une région de l'atmosphère assez élevée où la densité de l'air est plus faible que près du sol, atteignait 30 p. 100 de la portée calculée ! Aussi y aurait-il lieu de déterminer des formes rationnelles d'obus en s'appuyant sur les connaissances que l'on a maintenant des lois de la résistance de l'air. Pour cette étude, le procédé dû à Foucault et utilisé par Mach rendrait les plus

grands services en montrant immédiatement les remous, les tourbillons, les ondes que créent les projectiles proposés, aux vitesses mêmes où on les utilisera, ce que ne peuvent fournir les méthodes classiques « au tunnel » employées en aérodynamique, qui ne donnent la résistance globale à l'avancement que pour des vitesses de 40 mètres par seconde au maximum.

LE SON DU CANON

C'est un problème de physique des plus intéressants actuellement que celui de la détermination de la distance à laquelle le son du canon peut être entendu. Chacun peut se transformer en observateur et, ainsi que l'a demandé M. Bigourdan, membre de l'Académie des sciences, contribuer à la solution. Plusieurs théories ont déjà été émises par les météorologistes, entre lesquelles il faut maintenant choisir.

Le bruit de la bataille en pleine activité qui, à quelques kilomètres du front, se présente comme une formidable rumeur sur laquelle se détachent les coups plus forts des gros canons, pour un observateur au voisinage immédiat de la ligne de feu est beaucoup moins « flou ». On peut distinguer nettement chacun des bruits qui constituent la rumeur, claquements secs des 75, bruit strident des 90, son grave des gros canons, crépitement des mitrailleuses, etc. Pourquoi les sons se mélangent-ils donc ainsi après quelques kilomètres de parcours?

Diffraction et diffusion. — C'est par suite de la diffraction et de la diffusion. On sait que les ondes constituant les mouvements vibratoires auxquels nous devons la lumière ou le son peuvent se réfléchir sur des surfaces avec une perfection qui dépend de la rugosité de cette surface. Plus les ondes sont de courtes longueurs, plus il faut que les aspé-

rités de la surface soient petites. Pour la lumière, dont les longueurs d'onde sont de l'ordre du demi-millième de millimètre, une surface ne sera parfaitement réfléchissante que si ses rugosités sont au plus de l'ordre du dix-millième de millimètre. Pour les sons, la réflexion des ondes, l'écho, se produira si les aspérités de la surface réfléchissante atteignent quelques centimètres pour les ondes aiguës, ou quelques mètres pour les sons plus graves. Les grandes ondes sonores se réfléchissent bien sur des surfaces irrégulières et ignorent en quelque sorte les rugosités. Aussi peuvent-elles se propager à grande distance, tout au moins celles de grande longueur, et arriver jusqu'à l'oreille de l'observateur.

Le trajet est encore facilité par le fait que les ondes sonores, tout comme les ondes lumineuses d'ailleurs, lorsqu'elles frappent un obstacle, se reploient, se « diffractent » avec d'autant plus d'intensité que la longueur d'onde du mouvement est plus grande. C'est dire que le son ne suivra pas, comme la lumière, un chemin rectiligne, mais au contraire remplira tout l'espace ambiant.

Si nous comprenons facilement que le son puisse être perceptible à grande distance grâce à sa souplesse de propagation, il faut entrer dans une analyse plus serrée pour arriver à l'explication du phénomène très curieux des zones de silence que l'on avait observées déjà lors de quelques grandes explosions ou éruptions volcaniques, et que la guerre a permis de mettre en évidence d'une façon très nette. Nous emprunterons les renseignements suivants à une étude de M. Van Everdingen, directeur de l'Institut météorologique royal néerlandais.

Les zones de silence. — Les marins savent bien qu'il y a des circonstances dans lesquelles le bruit de la sirène ne s'entend plus, même à très courte distance, alors qu'ar-

rivé à une distance de quelques milles on en perçoit le sifflement avec une grande intensité. Pour les bruits de la bataille, on constate de pareilles anomalies. Mais ce qui est surtout remarquable, c'est qu'en dehors du premier domaine

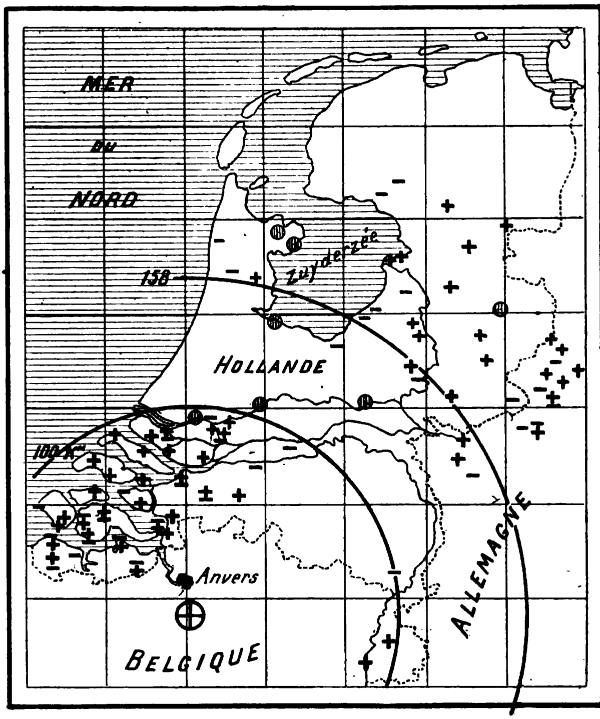


Fig. 127. — Zones d'audition et de silence pendant le bombardement d'Anvers du 8 octobre 1914.

d'audition autour de la source sonore, il en existe un second, parfois beaucoup plus étendu, où l'on perçoit nettement les bruits et qui est séparé du premier par une zone de silence. La figure 127 représente les zones d'audition et de silence en Hollande pendant le grand bombardement d'An-

vers du 8 octobre 1914. Une observation pure et simple est indiquée par un signe —, une observation de médiocre intensité par un +, un fort grondement accompagné de tremblement de vitres par ±, enfin un avis qu'aucun bruit n'a été entendu est marqué par un rond.

On remarque dans cette figure que la zone de silence est développée d'une façon très régulière, et ce qu'il y a de très remarquable c'est qu'au delà de la zone de silence il y a immédiatement des communications de grande intensité. De l'étude d'un grand nombre de cas, on peut déduire que souvent on constate une augmentation d'audibilité à partir de 160 kilomètres et qu'en dehors de ce cercle on a observé le grondement de la bataille plus fortement que dans une zone large de 40 à 50 kilomètres intérieure à ce cercle.

Deux sortes d'explications ont été proposées, l'une météorologique, l'autre physique, mais toutes deux voient dans la courbure des rayons sonores la raison du phénomène.

Explication météorologique. — Dans l'air en repos, l'abaissement de température fait diminuer la vitesse de propagation du son. Or, en moyenne, la température de l'atmosphère décroît de 0,5 à 1 degré par 100 mètres d'élévation. Par suite, le son doit se propager moins vite dans les couches élevées. Tout comme les rayons lumineux, les rayons sonores ne se déplacent pas rectilignement dans l'air, ils sont très fortement infléchis, et un rayon qui au début ne s'écarte pas de l'horizontale est rapidement courbé vers le haut et quitte la surface du sol. C'est ce qui explique la nécessité de munir les cloches d'abat-son pour que les rayons sonores des cloches, commençant par avoir une inclinaison négative, restent pendant un plus long espace au voisinage du sol et s'entendent à plus grande distance.

Le contraire a lieu lorsque la température croît de la surface du sol vers le haut, ainsi que cela s'observe surtout le

soir. Alors les rayons sonores sont mandés vers le sol et des bruits, même très peu intenses, deviennent perceptibles à grande distance, car la diminution d'intensité par suite de l'absorption par l'atmosphère est très faible, beaucoup plus faible que le long de la surface rugueuse de la terre.

Explication physique de van den Borne. — L'explication physique du phénomène est due à van den Borne qui admet qu'une partie au moins des zones de silence doit être attribuée au changement de composition de l'atmosphère résultant de la diminution inégale des pressions partielles des constituants de l'air avec la hauteur.

Si en effet on admet, pour simplifier, qu'il ne se produit aucun mélange des diverses couches atmosphériques, chacun des gaz formera une atmosphère suivant ses propres lois.

A grande hauteur, par suite, les gaz les plus denses n'existent plus que dans une proportion infime, et les constituants légers, hydrogène et hélium, deviennent prépondérants. Comme la vitesse de propagation du son est beaucoup plus grande dans l'hydrogène que dans l'azote et l'oxygène, à grande altitude la vitesse du son augmente à tel point que les rayons sonores sont recourbés vers le sol.

Les teneurs en hydrogène aux différentes altitudes seraient, d'après van den Borne :

0	20	40	60	80	100	kilomètres.
0,01	0,1	3	37,2	94,4	98,6	p. 100

La figure 128 donne une représentation de cette théorie basée sur une teneur d'hydrogène légèrement différente de celle admise par Borne. Ce qu'il y a d'intéressant à signaler, c'est non seulement que les rayons sonores reviennent vers la terre, mais qu'il existe une distance minimum pour le retour au sol et, d'après le calcul, le rayon sonore retourne vers 85 kilomètres et revient au sol à une distance moyenne de

160 kilomètres. De la figure résulte la propriété suivante : on peut prévoir qu'à la portion extérieure de la zone de silence; l'intensité du son sera relativement forte, plus forte entre A et B qu'entre C et D.

Quelque satisfaisante que paraisse l'explication physique,

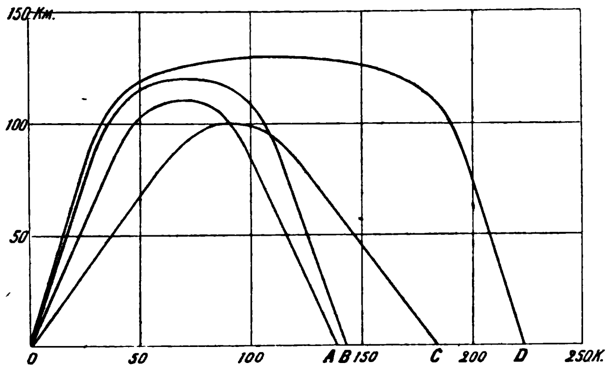


Fig. 128. — Construction de la marche des rayons sonores dans l'hypothèse d'une proportion de 0,00055 p. 100 d'hydrogène dans l'air.

aussi bien qualitativement que quantitativement, il y a encore des anomalies à expliquer que nous avons passées sous silence, mais il n'en est pas moins curieux de constater qu'indirectement les simples observations acoustiques peuvent contribuer à résoudre le problème de la composition de l'atmosphère à des niveaux où toute analyse directe est impossible.

Ajoutons, pour terminer, qu'il ne semble pas que la transmission du son s'effectue uniquement par l'atmosphère, d'après de récentes expériences dans lesquelles, en particulier, un sourd entendait en même temps qu'une personne à audition normale le bruit des coups de canon. Il est aussi à noter que, dans certains endroits encaissés, le son est perçu nettement, soit que l'excavation, par suite de sa forme, consti-

tue un gigantesque cornet acoustique qui recueille et concentre les imperceptibles vibrations qui se déplacent dans l'atmosphère, soit que les couches de terrain restituent, pourrait-on dire, à l'air, les vibrations que celui-ci leur a transmises.

L'USURE DES CANONS

Les bouches à feu s'usent très rapidement, surtout avec le service intensif qu'exigent les préparations d'artillerie, et on peut dire que toutes celles qui se trouvaient au front ont dû avoir leur tube remplacé au moins une fois. On admet en effet qu'un 75 ne tire pas plus de 10 000 coups. Quant aux grosses pièces, leur vie est comparable à celle des éphémères, et les gros canons des cuirassés qui ont bombardé les Dardanelles, ceux du *Queen Elisabeth* par exemple, sont hors service. La vie utile d'un canon est donc excessivement courte, par suite des érosions que nous venons de voir, par suite aussi du travail interne du métal soumis à des efforts violents et brusques au moment du départ du coup. Si on admet qu'un tube de 75 tire en moyenne 10 000 coups, comme la durée du trajet dans l'âme est d'environ 1/500 de seconde, c'est donc au bout de vingt secondes de travail que le canon est usé. Pour les grosses pièces de marine, qui ne tirent avant usure qu'un nombre de coups très limité, la vie du canon est encore plus éphémère et ne dépasse pas, dans certains cas, deux à trois secondes. Comment se produit cette usure et où se produit-elle?

C'est par l'érosion des parties du canon voisines de la naissance des rainures et qui correspondent à la région parcourue par le projectile avec une faible vitesse et sous les pressions les plus intenses.

Théorie de M. Vieille. — M. Vieille s'exprime comme suit dans un mémoire fondamental sur les canons :



Fig. 129. — L'intérieur de l'âme du canon après un tir prolongé.

« Le point de départ de ces érosions paraît être un réseau de fines craquelures qui tapissent la chambre aux environs du tronc de cône de raccordement avec l'âme. La profondeur et la largeur des craquelures parallèles à l'âme du canon vont croissant avec le nombre des coups, et leur réunion forme la nouvelle surface de l'âme, sur laquelle émerge un réseau d'îlots en saillie qui constituent comme les témoins de la surface primitive érodée par les gaz.

« L'origine du réseau des craquelures primitives peut être diversement expliquée : il me paraît qu'elle peut être rapprochée de la cémentation superficielle et de la trempe intense que prennent les surfaces d'acier doux soumises à l'action des gaz carburés provenant de la décomposition des explosifs. Cette action s'observe constamment dans les expériences en vase clos. La mince pellicule aciérée et trempée semble devoir se craqueler facilement, sous l'action des tensions con-

sidérables et des flambages auxquels elle est soumise dans les bouches à feu, et cette première phase du phénomène, qui donne un quadrillage régulier, serait tout à fait indépendante des fuites gazeuses, qui n'agiraient que pour en accentuer les éléments parallèles à l'axe.

« Ces fuites paraissent dues au défaut d'obturation de la ceinture, qui ne peut se mouler dans les fines craquelures dont il vient d'être question ; les gaz tendent alors à s'écouler par ces interstices, de la chambre à poudre au dehors, avec des vitesses incomparablement plus grandes que celles du projectile. Les craquelures parallèles à l'axe constituent le chemin d'écoulement le plus direct suivi par le gaz et ce sont, en effet, celles qui, d'après l'observation, subissent le plus rapide accroissement...

« Le phénomène qui vient d'être décrit constitue le phénomène d'érosion normal et constant.

« Sur ce phénomène viennent parfois se greffer des altérations de la paroi très importantes, localisées en certains points et provenant vraisemblablement de quelque défaut présenté à l'origine par la surface de l'âme ou d'une imperfection locale de l'obturation par la ceinture : on voit apparaître en ces points irrégulièrement disposés des érosions profondes pouvant atteindre, par la réitération des tirs, plusieurs millimètres de profondeur. »

Autres théories. — Ainsi, pour M. Vieille, c'est la cémentation de l'acier sous l'action des gaz à haute température qui produit l'érosion.

Pour d'autres techniciens, la cause principale est l'action chimique des gaz de la charge. C'est en particulier l'opinion des techniciens allemands.

Le colonel Charbonnier accuse les tourbillons de particules gazeuses qui se forment au voisinage du cône de raccorde-

ment de la chambre et de l'âme, lorsque la veine gazeuse est forcée de se retrécir.

Enfin Tchernov attribue tout le mal à la température trop élevée de la combustion de la poudre qui ne devrait pas dépasser 1 000 degrés et à la nature de l'acier qui devrait posséder une grande plasticité et une grande ténacité pour résister aux alternatives de dilatation et de contraction.

On voit que les avis sont fort partagés et que les remèdes que proposent les auteurs sont absolument différents : diminuer la température des gaz pour les uns, perfectionner l'obturation pour d'autres, modifier le tracé intérieur, etc.

Ajoutons que dans le cas des pièces de très gros calibre, l'usure à chaque coup de canon est très notable. A la bouche on voit se former un nuage métallique de particules arrachées par les gaz aux parois de l'arme. On admet que pour les canons de gros calibre, à chaque coup tiré il y a au moins 500 à 1 000 grammes de métal ainsi enlevé au tube-canon.

Dans les canons de l'artillerie moderne, les érosions sont moins fréquentes, bien que l'on observe très fréquemment le réseau de craquelures.

Même lorsque l'érosion n'existe pas, le canon s'use parfois à la bouche, les parois du cône de raccordement de la chambre à l'âme rayée sont polies, et le diamètre de l'âme augmente. Cette usure croît avec la température de combustion ou le poids de la poudre, et avec le calibre.

Ces phénomènes entraînent une diminution de la vitesse initiale et une augmentation de la dispersion des coups.

Pour étudier le pouvoir d'érosion des poudres, on se sert d'un appareil constitué essentiellement par une chambre en acier fermée par un bouchon en acier muni d'un trou axial. On met une charge de poudre dans l'appareil, les gaz

s'échappent par le trou du bouchon en érodant ses parois. La perte de poids du bouchon définit l'usure. Un manomètre à écrasement permet de mesurer les pressions développées par la combustion.

LES EFFETS PRODUITS PAR LES PROJECTILES

Les actions plus ou moins extraordinaires des projectiles, les blessures bizarres, presque inexplicables, qu'ils produisent ont été maintes fois signalées et par la photographie et par les récits de témoins oculaires véridiques. Nous ne les décrirons pas, et nous allons simplement exposer un certain nombre de faits et de propriétés physiques, moins connus, mais d'apparence tout aussi paradoxale.

Phénomènes généraux. — Parmi ces effets des balles, il en est que la photographie a saisis et qui, sans cela, auraient toujours été insoupçonnés. L'un des plus curieux est celui des projections à allure explosive qui accompagnent le passage de la balle à travers un obstacle fluide ou semi-fluide. L'explosion n'a pas lieu immédiatement. Une vessie pleine d'eau explose un dixième de seconde après sa perforation. La balle D allemande projette dans toutes les directions les fragments d'une boule de terre glaise d'un diamètre inférieur à 30 centimètres. Pour des boules plus grosses, l'orifice de sortie est 300 fois environ plus grand que l'orifice d'entrée. Il semble que le projectile, en rencontrant les diverses parties du corps, les transforme en projectiles secondaires, de la même façon qu'une bille de billard heurtant d'autres billes communique à chacune d'elles une partie de son énergie.

Quand on tire de haut en bas dans une masse d'eau considérable des balles animées de grandes vitesses (de l'ordre de 800 mètres par seconde), l'enveloppe de la balle se brise

au contact de l'eau par suite de l'énorme résistance d'inertie de cette dernière et, dans ce cas encore, la projection en arrière de particules liquides indique bien que le phénomène a une allure explosive.

L'inertie joue un grand rôle dans les actions des balles, et cette propriété fondamentale de la matière permet d'interpréter les phénomènes expérimentaux.

Des considérations élémentaires suffisent pour se rendre compte que du choc de deux corps résulte, au point de contact, une pression énorme. Bien que le temps de contact entre une balle de tennis, par exemple, et la raquette soit extrêmement court, tout le monde sait qu'il lui est pourtant communiqué une vitesse considérable.

Quand deux billes de billard se heurtent, la pression moyenne sur la très petite surface de contact est d'environ 2 000 kilogrammes par centimètre carré, et peut même atteindre 3 000 kilogrammes. Avec des billes creuses en acier, ayant la même masse que les billes de billard, la pression moyenne au point de contact est environ 100 fois plus grande. La résistance extraordinaire que présentent ainsi les billes aux pressions développées par le choc est due en partie au temps extrêmement court pendant lequel elles restent en contact et en partie aux pressions latérales exercées par le métal entourant le point d'impact. Pour amener la rupture ou une déformation permanente, il faut provoquer des pressions très différentes suivant la direction d'action.

Quand un corps mou rencontre une surface dure, par exemple une balle frappant un blindage, la pointe de la balle s'écrase sur l'obstacle et la pression développée, qui peut atteindre 3 000 kilogrammes par centimètre carré, n'est pas la même à chaque instant dans toute la masse du projectile. Avec des projectiles en acier, une onde de compression prend naissance au point de contact, se propage dans la

masse avec la vitesse propre du son dans le métal et se réfléchit à l'autre extrémité en donnant une onde de dilatation. Il en résulte que des variations de tensions extrêmement brusques et intenses sont développées dans le projectile qui peut éclater sous leur action.

Dans le cas des coiffes, ou des pointes en acier spécial extra-dûr, comme les cônes de choc des obus de marine, les effets de pénétration sont dus plus à l'inertie de la coiffe qu'à sa résistance mécanique. Au moment du choc, le cône tend à s'écraser brusquement, mais l'inertie de sa masse développe des pressions latérales suffisantes pour l'empêcher de s'aplatir sur l'obstacle.

Les effets des projectiles sur les corps solides qu'ils heurtent sont mal connus et, dans l'état actuel de la science, on n'a que de rares indications sur ces phénomènes très complexes dont l'allure est paradoxale lorsqu'on les examine de près.

Les lois de l'éclatement. — Lorsque les corps éclatent par le choc, leurs sectionnements partent tous d'un foyer

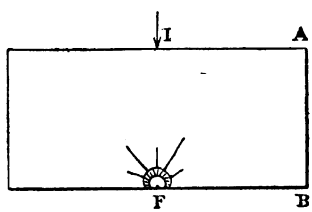


Fig. 130. — A, face qui a reçu le choc ; I, point d'impact ; B, face opposée à celle qui a reçu le choc ; F, foyer d'éclatement.

d'éclatement, tout à fait distinct du point de contact avec le corps frappant, et l'orientation de ces sectionnements est sans lien direct avec l'action des forces extérieures, comme avec la répartition des tensions précédant la rupture.

Dans le cas d'un choc sur une plaque de verre, le foyer d'éclatement se trouve près de la paroi opposée à celle qui a été heurtée (fig. 130), et, fait curieux, les cassures tendent cependant à revenir vers le point de choc par des chemins sinueux.

De plus, l'éclatement, qui paraît instantané, est au contraire progressif, car les sectionnements se recoupent les uns les autres dans un ordre que l'on arrive à déterminer. M. de Freminville, qui a étudié avec soin ces phénomènes, énonce les conclusions suivantes :

1° Toutes les cassures ont pour origine un éclatement prenant naissance au sein de la masse et ne se développent que par une succession d'éclatements. Dans la cassure soudaine, l'éclatement est *généralisé* ; dans la rupture progressive, l'éclatement est *localisé*.

2° Le premier éclatement, origine de toute rupture, se produit dans une région où la tension dominante est positive, c'est-à-dire capable de produire un allongement, mais pas forcément au point où cette tension atteint la plus grande valeur.

Comme conclusion immédiate montrant l'application pratique de la théorie, on peut déduire que, si l'on veut éviter l'éclatement, il faut réaliser, par une opération antérieure, des tensions initiales négatives (compressions) favorables à la résistance : d'où le frettage des canons et des essieux de locomotives ; si l'on désire provoquer l'éclatement aussi complet que possible dans un obus, il faut mettre l'acier de cet obus dans des conditions où les tensions positives se trouvent, au contraire, toutes préparées.

Prenons un exemple particulier : celui d'une dalle de verre de 20 millimètres tenue à la main et cassée par un coup de marteau en I (fig. 131 et 132).

Un foyer d'éclatement s'est formé en F près de la face B, à

l'opposé du point d'impact, autour duquel se sont développées : 1° des stries et fissures rayonnantes ; 2° des surfaces dépolies formant des barbes de chaque côté du foyer ; 3° une

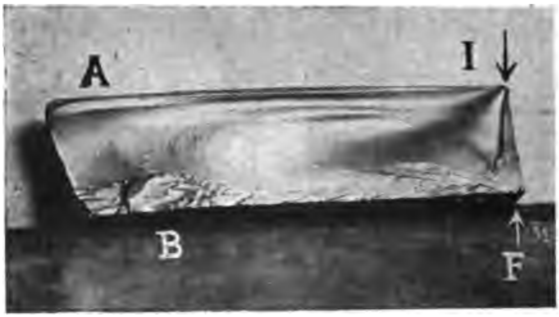


Fig. 131. — Vue d'une cassure-type dans une dalle de verre de 20 millimètres.

surface lisse partant du même foyer pour se rapprocher de la surface A, au voisinage de laquelle elle change brusquement de direction et devient parallèle à cette face A suivant αβ, au lieu de rester perpendiculaire suivant *xx*; mais, dans la région

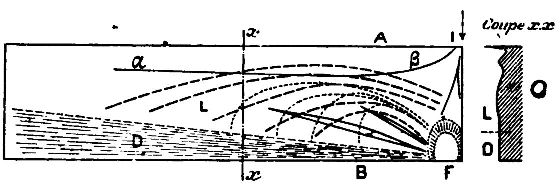


Fig. 132. — Schéma de la cassure-type représentée par la figure 126.

voisine du point d'impact I, elle se dirige vers ce point et le rejoint.

Ce sectionnement parallèle à la surface aboutit à donner des cheminements parallèles entre eux, que les tailleurs de haches en silex préhistoriques ont largement utilisés pour façonner leurs instruments.

Explication de la rupture. — Par quel mécanisme le phénomène s'est-il produit, dans le cas choisi de la dalle de verre? Le choc a produit une compression en I (ou une tension négative) équilibrée à l'intérieur par une tension positive, mais il n'y a pas de raison pour qu'il en résulte directement une rupture, puisque cette pression se transmet aux parties intérieures de la dalle en y comprimant les molécules. C'est seulement lorsque, de proche en proche, comme dans une file de billes se poussant l'une l'autre, la pression arrive près de la surface libre opposée et tend à la dilater sans être équilibrée, qu'elle provoque une rupture par poussée au vide, sous la forme d'un premier déplacement élémentaire donnant le foyer d'éclatement. Alors, par les tensions élastiques libérées au moment de la première rupture, il se transmet, à partir de ce premier foyer, dans le milieu voisin, des tendances au sectionnement qui vont revenir en arrière en profitant des tracés préparés par le passage des premières tensions, mais nullement, comme on aurait pu le croire, en se moulant sur eux.

C'est peut-être parce qu'un premier choc a créé des zones faibles permanentes pour un certain temps, que deux chocs légers successifs déterminent une rupture, dont un seul choc violent serait incapable. On brise le pied d'un verre en donnant deux petits coups sur deux points opposés de la même base, non en frappant un seul coup beaucoup plus fort. D'où ce résultat imprévu qu'une nappe sur une table rend plus destructeur le choc d'un verre, ou l'interposition d'un caoutchouc celui d'une automobile contre un mur. La nappe, en atténuant le refroidissement, amène en effet un second choc du verre, à un instant trop rapproché du premier choc.

Si les phénomènes qui accompagnent l'écrasement d'une balle ou d'un projectile sur un obstacle sont des plus étranges et des moins connus, il en est de même de ceux qui se pro-

duisent lors de l'éclatement d'un projectile chargé en explosif.

La mort par décompression. — L'explosif peut agir de deux façons différentes, soit qu'il projette des éclats dans l'air, formant autant de projectiles secondaires, soit qu'il détermine une onde, un « souffle » détruisant et tuant dans un certain rayon autour du point d'impact par un mécanisme dont nous allons dire quelques mots, d'après une étude de M. Arnoux présentée à l'Académie des sciences.

On a souvent constaté que beaucoup de cadavres, sur les champs de bataille modernes, ne présentaient aucune blessure apparente et conservaient l'attitude qu'ils avaient au moment où la mort les avait frappés. On avait pensé devoir incriminer les gaz nocifs de l'explosion, mais la mort dans ce cas ne serait pas instantanée ; il faut au contraire admettre la mort par *foudroiement*, comme l'a montré M. Arnoux.

En procédant à l'examen d'un baromètre anéroïde faussé par l'explosion voisine d'un gros obus allemand, cet ingénieur a constaté que son dérangement était dû au gonflement anormal de la boîte anéroïde, et que ce gonflement ne pouvait entraîner les effets constatés que si la pression descendait au moins à 410 millimètres de mercure, pression correspondant sensiblement à celle qui règne à une altitude de 4 800 mètres.

On peut donc déduire de cette constatation que l'explosion de l'obus a déterminé une dépression d'au moins 350 millimètres de mercure, la pression atmosphérique étant de 760 millimètres.

Les lois aérodynamiques donnent alors, pour la vitesse de refoulement de l'atmosphère, 276 mètres par seconde, et pour la pression dynamique, 10 360 kilogrammes par mètre carré.

Sous une telle pression, tous les objets situés à proximité sont jetés sur le sol et les êtres vivants écrasés par ce déplace-

ment d'air. Quant à ceux placés à l'abri de l'onde directe, ils sont atteints par la dépression statique de l'atmosphère et les phénomènes dont ils sont victimes sont identiques à ceux que l'on observe dans les scaphandres ou dans les travaux dans les cloches sous pression pour le foncement des constructions sous-marines.

L'air et l'acide carbonique se dissolvent dans le sang, comme tous les gaz dans tous les liquides, dans une proportion d'autant plus grande que la pression est plus élevée. Lorsque cette pression vient à diminuer, ils se dégagent en formant dans le sang des bulles gazeuses. C'est exactement ce qui se produit lorsqu'on débouche une bouteille d'eau gazeuse. Mais alors que les bulles passent facilement par le goulot de la bouteille, elles sont immobilisées au contraire, en raison de leur volume, dans les vaisseaux capillaires sanguins infiniment ténus, qu'elles obstruent en arrêtant instantanément la circulation du sang.

Le phénomène n'est dangereux que si la dépression à laquelle se trouve soumis l'organisme est très brusque, car le volume des bouchons gazeux formés est alors très grand. Leurs dimensions sont supérieures à celles des vaisseaux capillaires qui sont par suite obstrués. Il se produit une embolie gazeuse foudroyante. Le phénomène est connu depuis longtemps. Observé en aéronautique (mort de Crocé-Spinelli et de Sivel à bord du ballon *le Zénith* en 1875), il l'a été fréquemment également chez les scaphandriers qui travaillent parfois à des profondeurs de 25 et 30 mètres, correspondant à des pressions de 2 à 3 atmosphères, et dans les caissons de fondation sous l'eau où cependant la pression est rarement supérieure à 2 atmosphères, mais dans aucun de ces cas il ne présente l'intensité suffisante pour produire les effets terribles et instantanés des obus.

L'ÉTUDE PHYSIQUE DES EXPLOSIFS

On se fait sur la puissance des explosifs des idées en général erronées et on n'a sur leur mode d'étude que des indications fort vagues; aussi est-il bon de voir d'un peu près la question des explosifs et de leurs effets, ne serait-ce que pour montrer aux chercheurs qui rêvent de trouver l'explosif idéal dont la puissance, supérieure à tout ce qui existe, anéantirait les ennemis d'un seul coup, comment leurs efforts doivent être dirigés et les résultats auxquels ils peuvent prétendre arriver.

Les propriétés que présentent les explosifs sont classées sous les noms généraux de puissance, vitesse d'explosion, stabilité, toxicité, etc. Nous ne nous occuperons ici ni de la stabilité, ni de la toxicité, pour ne considérer que le problème physique. Non que les propriétés laissées ainsi à l'écart soient négligeables, la stabilité ayant une importance telle qu'elle suffit à faire rejeter certaines poudres excellentes au point de vue balistique; quant à la toxicité, elle n'a pas grande importance dans l'artillerie de terre de campagne, l'atmosphère étant le meilleur des absorbants des gaz, mais il n'en est pas de même en marine ou dans l'artillerie de forteresse. Surtout en marine, où les tourelles sont presque hermétiquement closes, où les pièces en action sont généralement de très gros calibre et par suite consomment à chaque coup plusieurs centaines de kilogrammes de poudre, il se crée bientôt non seulement dans la tourelle, mais autour du bateau lui-même, une gaine de gaz, peroxyde d'azote, acide carbonique, oxyde de carbone, azote, etc., si épaisse, si irrespirable, que l'emploi des masques contre les gaz asphyxiants a été prescrit à bord.

Sous le terme assez vague de « puissance », on réunit deux propriétés différentes : la pression développée par l'explosif

détonant dans un vase clos, et le travail fourni par l'expansion des gaz de l'explosion.

Détermination de la pression par les crushers. — Pour déterminer la pression, on mesure l'écrasement de petits cylindres de cuivre dits « crushers », aplatis par un piston mobile pressé lui-même par les gaz de la poudre.

Les crushers habituels, de 8 millimètres de diamètre et

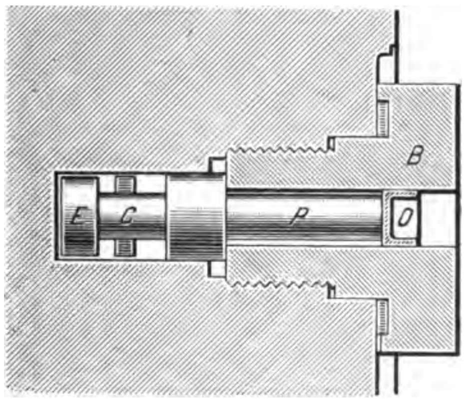


Fig. 133. — Disposition générale d'un appareil crusher servant à mesurer les pressions dans l'âme des bouches à feu.

13 millimètres de hauteur, s'écrasent environ de moitié pour une pression de 3 500 kilogrammes par centimètre carré.

Pour déterminer la pression maxima, l'appareil crusher est installé sur la face avant de la culasse 1, par exemple ; il est fermé par un bouchon vissé B (fig. 133), percé d'un trou central où se déplace, par la pression des gaz, un piston en acier P muni d'un obturateur en cuivre O. Le cylindre crusher C, guidé par une bague de caoutchouc, s'écrase entre ce piston et une enclume également en acier. On mesure la diminution de hauteur au centième de millimètre. Une table de tarage, établie en exerçant préala-

blement sur des crushers analogues des pressions connues et mesurant les déformations correspondantes, permet de trouver la pression de l'explosion.

Pour la poudre noire, avec une densité de chargement égale à 1, c'est-à-dire une charge de 1 gramme par centimètre cube, la pression atteint 6 500 atmosphères. Lorsque l'on étudie les nouvelles poudres, comme on cherche à ce que la pression à l'intérieur des canons ne dépasse pas 3 000 atmosphères, on détermine facilement par cette méthode la densité de chargement à réaliser. Mais si, au point de vue pratique, ces indications suffisent, on n'a pas cependant de renseignement sur la pression maxima que peut développer un explosif à pleine densité de chargement, c'est-à-dire lorsque toute la capacité est remplie d'explosif (cas des obus ou des trous de mines). Dans ces conditions, tout ce que l'on peut dire, c'est que les pressions dépassent 10 000 atmosphères, puisque l'éprouvette ne résiste pas et que l'acier cède à des pressions supérieures. On n'a donc aucun renseignement précis dans le cas des explosifs compacts. Les tables de tarage en usage sont d'ailleurs entachées d'erreurs que l'on estime atteindre 10 à 15 p. 100 de la valeur de la pression réelle, ce qui ne permet que des comparaisons entre les diverses poudres et interdit les mesures absolues.

Le chronographe Le Boulangé. — Quant au travail développé, c'est de lui que dépend la force vive communiquée aux projectiles. Aussi pour l'évaluer on mesure directement la vitesse de l'obus à la sortie de l'âme de la pièce à l'aide du chronographe Le Boulangé.

Le principe de cet appareil est la mesure du temps qui s'écoule entre la rupture de deux fils métalliques tendus sur des cadres placés sur la trajectoire. La disposition générale est représentée figure 134 et l'appareil lui-même figure 135.

Les cadres sont constitués par des fils de cuivre formant un réseau tendus sur des châssis en bois suspendus à des charpentes en fer. Ils peuvent être placés à différentes hauteurs, suivant l'angle de pointage de la pièce, pour que le projectile les traverse. Pour que le souffle de la pièce ne détériore pas le premier cadre, celui-ci est placé à une distance de la pièce d'environ 300 calibres. C'est qu'en effet les gaz sortant du canon forment une véritable trombe dont les actions se font sentir assez loin de la pièce, produisant, lorsque celle-ci est de gros calibre, l'arrachement des arbres voisins, l'érosion du sol, etc. Aussi, dans les polygones d'essais, le terrain situé devant la pièce est toujours recouvert d'une épaisse couche de béton.

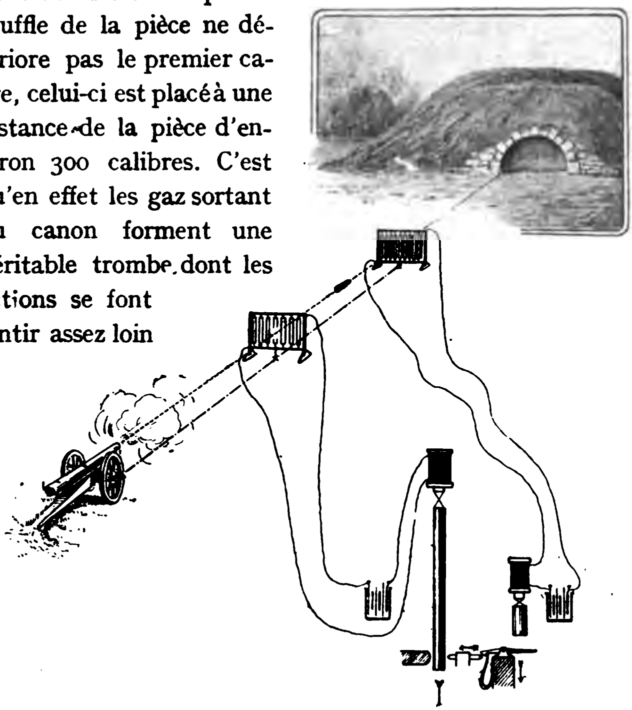


Fig. 134. — Disposition des circuits du chronographe Le Boulangé.

La distance entre les deux cadres de l'appareil Le Boulangé est variable, en général, 20 à 50 mètres. Cette dis-

tance étant mesurée avec précision, si on évalue le temps de parcours (de l'ordre du centième de seconde) on en déduira immédiatement la vitesse moyenne du projectile dans ce faible parcours, c'est-à-dire à très peu près la vitesse initiale.

Pour mesurer ce temps très court, bien des dispositifs peuvent être imaginés. Dans les polygones, les cadres, qui font partie d'un circuit électrique, sont reliés au chronographe proprement dit. Cet appareil est constitué par une colonne, que l'on doit rendre rigoureusement verticale, et de chaque côté de laquelle est installé un électro-aimant. L'un d'eux est placé dans le circuit du premier cadre et peut supporter une armature appelée chronomètre, formée d'un long tube en laiton portant à la partie supérieure un fer doux. Ce tube est revêtu d'une chemise amovible en cuivre. L'autre électro-aimant, actionné par le courant qui passe dans le circuit du deuxième cadre, peut également supporter une armature, désignée sous le nom d'enregistreur, de même poids que le chronomètre, constituée par un cylindre court, muni, comme le premier, d'un fer doux à sa partie supérieure. Au moment du tir, le projectile coupe d'abord le premier circuit; le chronomètre tombe vers le sol en chute libre, mais, lorsque le projectile rencontre le deuxième cadre, il coupe

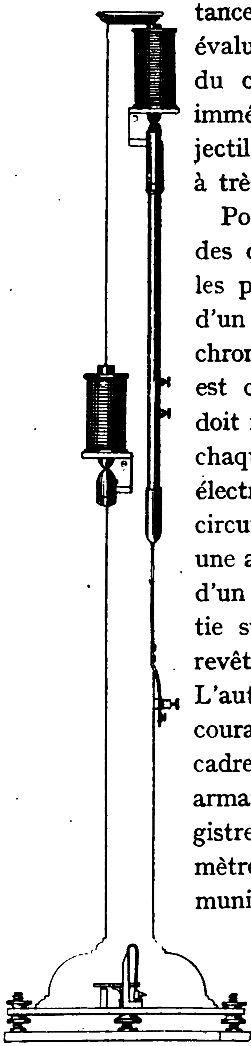


Fig. 135. — Le chronographe Le Boulangé.

le deuxième circuit : l'enregistreur tombe à son tour et vient frapper un déclanchement qui libère un ressort placé à l'arrière d'un couteau ; ce couteau se trouve alors projeté sur la chemise du chronomètre et y fait une empreinte qu'il est très facile de reconnaître. L'intervalle compris entre un repère zéro gravé à la base du chronomètre et cette empreinte permet d'évaluer, au moyen d'une table de correspondance, le temps qui s'est écoulé entre la chute du chronomètre et celle de l'enregistreur, c'est-à-dire pendant la durée du trajet du projectile entre les deux cadres. Pour donner une idée de la précision, disons que la vitesse de chute après 1 mètre, de la masse chronomètre, est de $4^{m},4$. C'est dire que le millième de seconde correspond à un déplacement de $4^{mm},4$.

Voici, d'après des expériences de Noble, quelques résultats sur des projectiles de masse différente lancés par un même canon avec la même charge de poudre :

Masse du projectile en kg.	Vitesse en mètres par seconde.	Force vive en kilogrammètres.
13	640	293 000
40	410	360 000
67	325	365 000
163	210	365 000

Pour fixer les idées, la force vive développée dans ces expériences, et qui est remarquablement constante, correspond à celle qu'un guerrier de l'antiquité aurait pu développer en quatre ou cinq jours de travail ininterrompu employé à bander une catapulte.

Mesure optique des pressions. — On peut utiliser les phénomènes d'interférence pour mesurer les pressions à l'intérieur des canons, et voici comment : lorsque deux lentilles de verre sont au contact, il se forme des franges d'interférence dites anneaux de Newton, dont le diamètre

augmente ou diminue en même temps que la pression qui s'exerce sur les lentilles. Si la pression est produite par la déflagration des gaz et se transmet par l'intermédiaire d'un piston sur le système de Newton, on peut, un étalonnage préalable ayant été fait à l'aide d'une presse hydraulique, déduire la valeur de cette pression de l'augmentation du diamètre des anneaux sous son action (bombe de Petavel).

Les Allemands ont utilisé ce dispositif pour l'étude des pressions à l'intérieur du fusil d'infanterie modèle 1898.

Dans la chambre du fusil allemand modèle 98 tirant la balle S, la température au moment de l'explosion atteint 2 100 degrés et la pression 3 500 atmosphères. Sous cette action, le projectile prend une vitesse de rotation de 700 tours à la seconde et sort de l'arme en un cinq-centième de seconde, la pression tombant alors à 400 atmosphères.

La mesure de la puissance. — La mesure de la puissance peut encore être réalisée par d'autres moyens plus empiriques. On emploie souvent la méthode dite du bloc de plomb de Tranzl. Dans une cavité de forme cylindrique ménagée dans un bloc de plomb, on place une quantité déterminée d'explosif et on le fait détoner. De la comparaison de la déformation produite dans la cavité par l'explosif étudié et par un explosif type, on déduit quelques renseignements comparatifs.

On peut se servir également du pendule balistique. L'explosif est disposé à l'intérieur d'un canon de fusil suspendu à un fil. Le fusil oscillera d'une façon vaguement en rapport avec l'énergie de l'explosif (1).

(1) La vitesse de recul se détermine en appliquant le théorème de mécanique relatif au mouvement du centre de gravité. Comme il s'agit ici de forces intérieures développées pendant le tir, le centre de gravité de l'ensemble doit rester constamment immobile, de sorte que la somme des projections

Il n'est pas besoin d'insister sur le peu de valeur de ces méthodes : la poudre ne donne rien avec le bloc de Tranzl et le fulminate de mercure brise le pendule balistique sans le faire osciller.

La comparaison des divers explosifs peut enfin s'effectuer en mesurant la quantité de chaleur que dégage leur combustion. On obtient alors les résultats suivants :

	Énergie en milliers de calories.		Énergie en milliers de calories.
Gélatine explosive ...	1 640	Cordite anglaise	1 253
Nitroglycérine	1 580	Nitrocellulose	1 061
Gélatine dynamite 63 p. 100	1 321	Dynamite 30 p. 100 ..	1 030
Balistite italienne ...	1 317	Poudre B IV française.	833
— allemande ...	1 291	Acide picrique	800
Dynamite 45 à 75 p. 100	1 290	Poudre anglaise 55 ...	799
		— noire	685
		Fulminate de mercure.	410

Une grandeur intéressante à considérer est le rendement calorifique de l'arme. En effet une arme à feu, fusil ou mitrailleuse, est absolument comparable à un moteur d'automobile.

Trois grammes de poudre sans fumée dégagent par leur combustion 2 712 calories environ qui se répartissent de la façon

des quantités de mouvement (mv) sur un axe quelconque doit toujours être égale à zéro.

On obtient ainsi, pour la vitesse de recul V :

$$V = \left(p + \frac{p'}{2}\right)\frac{v}{P}.$$

P étant le poids de l'arme, v la vitesse initiale du projectile, p le poids du projectile, p' le poids de la charge.

L'énergie de recul E_R est donnée par :

$$E_R = \frac{1}{2}\frac{P}{g}\cos^2 \alpha,$$

g étant l'accélération de la pesanteur et α l'angle de l'axe du canon avec celui de la crosse. Dans les fusils, E_R est de l'ordre de 1 kilogrammètre.

suivante : la force vive du projectile en absorbe 905, le mouvement de rotation de la balle 4,8, le recul de l'arme 3, l'échauffement et les fuites dans l'air 1 700. Le rendement, c'est-à-dire le rapport de la quantité de chaleur utilisée à la quantité totale de chaleur fournie, est excellent : il est voisin de 53 p. 100 ; un tel rendement n'est guère atteint que par les meilleurs moteurs à explosion, si les nombres précédents sont exacts.

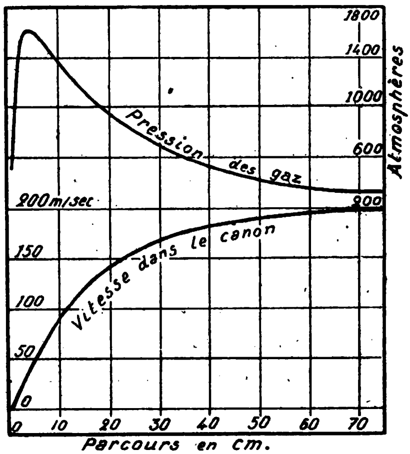


Fig. 136. — **Comment varient dans le canon la pression des gaz de la poudre et la vitesse du projectile.**

La vitesse de propagation de l'explosion. — On voit que le fulminate de mercure, explosif des plus violents cependant, vient le dernier sur la liste et loin derrière l'antique poudre noire. Ce résultat, paradoxal à première vue, s'explique lorsque l'on considère la vitesse d'explosion et non plus l'énergie des explosifs, qui ne varie guère que du simple au double, de la poudre noire à la dynamite grossière, et qui conduit à cette conclusion inattendue qu'au point de vue de la puissance tous les explosifs se valent.

Au contraire, la vitesse de propagation de l'explosion varie dans des limites extrêmement grandes, pouvant dépasser le rapport de 1 à 1 million, non seulement entre les divers explosifs, mais, pour le même explosif, suivant les conditions de l'emploi. C'est ainsi, par exemple, que la poudre B brûle à l'air libre relativement difficilement et que, dans le canon, sa combustion est excessivement rapide. De même l'acide picrique brûle à l'air; convenablement amorcé, il détone violemment.

Ces différences dans les effets mécaniques proviennent uniquement de la différence des vitesses de combustion et de propagation de la réaction.

Dans les mélanges gazeux, la flamme se propage soit par conductibilité calorifique, avec de faibles vitesses de l'ordre du mètre par seconde, comme c'est le cas lorsque l'on brûle le gaz d'éclairage qui remplit un tube de verre. Si, au contraire, il y a agitation des couches gazeuses, ayant pour effet d'échauffer plus rapidement les tranches de gaz voisines de celles en ignition, le phénomène se produit avec des vitesses pouvant atteindre 1000 mètres par seconde. Enfin, dans certains cas, lorsque le mélange est très combustible, il se produit, lorsqu'on l'allume, une explosion de la partie avoisinant le lieu d'inflammation ; cette explosion provoque la formation d'une onde qui comprime violemment les couches de gaz avoisinantes. Or on sait que toute compression très rapide, « adiabatique », produit une élévation considérable de température. Si l'élévation ainsi déterminée dans le gaz l'amène à sa température d'inflammation, l'explosion se propage de proche en proche avec une vitesse très grande, 4000 à 6000 mètres à la seconde.

On rencontre, dans l'étude des explosifs solides, les trois modes de combustion que nous venons de définir pour les gaz. Dans les poudres, c'est le second régime, qu'on appelle

la *déflagration*, qui s'établit, grâce à la pression. En effet, toutes les réactions chimiques s'accomplissent en général d'autant plus facilement que la température et la pression sont plus élevées. Dans la gargousse d'une cartouche, les premières parcelles de poudre qui brûlent dégagent des gaz qui élèvent la pression et en même temps la température, de sorte que la réaction amorcée s'accélère. Elle est complète avant que le projectile n'ait commencé à se déplacer dans l'arme. Comme la combustion s'effectue par la surface des corps, plus la poudre sera fine, c'est-à-dire plus elle présentera de surface pour un poids donné, plus la déflagration sera rapide. C'est un fait bien connu des chasseurs qui emploient les poudres très fines pour avoir une plus grande portée.

Poudres progressives. — Pour augmenter la portée, on peut aussi augmenter la charge, mais il ne faut pas dépasser une

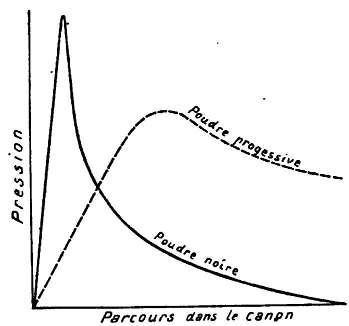


Fig. 137. — Variation de la pression dans l'âme du canon dans le cas d'une poudre noire ou d'une poudre progressive.

certaine limite, sous peine de faire éclater le canon. D'après ce que nous venons de dire, pour rendre la poudre *progressive*, c'est-à-dire pour pousser le projectile pendant tout le temps qu'il est dans le canon de l'arme, au lieu de lui donner un choc violent comme dans le cas des poudres

noires fines qui déterminent une élévation de pression instantanée mais peu durable (fig. 137), il faut augmenter la dimension des grains, pour réduire la surface de combustion.

M. Vieille est arrivé à ce résultat en utilisant une matière explosive capable de se mouler en grains de dimensions rigoureusement égales et dont par suite on connaîtra exactement les propriétés de combustion. Les poudres progressives sont toutes constituées de grains de formes géométriques définies (carrés ou rectangles pour le fusil ou le 75; cubes, cylindres hexagonaux ayant jusqu'à 2 centimètres d'arête et 3 centimètres de haut pour les canons de marine de gros calibre, etc.).

Les chiffres suivants font comprendre l'importance du perfectionnement :

Canon.	Masse du projectile.	Poids de poudre.		Pression maxima dans le canon.
90	8 kilogrammes	Poudre noire	1,9	2 360 kilogrammes.
90	8 —	Poudre B	0,72	1 600 —

Si les poudres dans leur fonctionnement normal déflagrent, les explosifs, au contraire, brûlent suivant le troisième mode indiqué plus haut, par choc, dont la vitesse de propagation est de 2 000 à 5 000 mètres par seconde.

Les vitesses énormes de propagation de l'explosion, grâce à la loi générale de l'inertie, font que l'explosif détone dans son propre volume avant que les produits gazeux formés aient eu le temps de se déplacer d'une quantité notable. Il en résulte que les effets obtenus sont très sensiblement les mêmes, pour les explosifs violents, dynamite, panclastite, que ceux-ci soient enfermés dans l'enveloppe résistante des obus ou dans une simple cartouche en étain.

Pression maxima de l'explosif. — Considérons une masse M d'un explosif dans une bombe de volume V. La

densité de chargement Δ est $\frac{M}{V}$. Si les parois sont suffisamment résistantes pour ne pas céder à l'explosion, la pression maxima P est donnée par la formule de Noble et Abel :

$$P = \frac{f\,\Delta}{1 - n\,\Delta},$$

f et n étant des constantes pour chaque explosif. Le tableau suivant donne quelques valeurs de ces coefficients.

EXPLOSIF.	Molécules-grammes.	Chaleur dégagée (grandes calories) par molécule-gramme.	$\frac{f}{981.000}$	n.
Nitroglycérine	227	334	10.084	0,712
Coton-poudre	1.143	1.230	9.640	0,859
Fulminate de mercure	284	1.115	4.529	0,314
Hydrogène + oxygène	18	58,2	18.145	1,24
Poudre noire	»	966	2.804	0,472

f est ce qu'on appelle la *force* de l'explosif ; quant à n, on lui donne le nom de *covolume*.

On voit que les mélanges gazeux donnent des valeurs de f très grandes. Ils donneraient donc de très fortes pressions explosives si on les comprimait préalablement de façon à leur donner une grande densité de chargement. Comme ce n'est généralement pas le cas, les pressions pratiques sont beaucoup moins élevées.

La loi de Noble et Abel est d'ailleurs loin d'être rigoureuse. Ce n'est qu'une approximation. Les raisonnements faits pour chercher à la déduire des lois de compressibilité des gaz et à assimiler le coefficient n au covolume physique sont absolument illusoires.

L'épaisseur des obus. — Il ne faut donc pas croire que

l'épaisseur des parois des obus soit calculée pour permettre l'explosion complète de leur charge ; c'est à une autre condition qu'elles satisfont : elles sont établies pour résister uniquement aux efforts mécaniques développés au moment du départ du coup. C'est encore l'inertie qui régit le phénomène. En effet, lorsque la poudre communique une accélération énorme au projectile qui de la

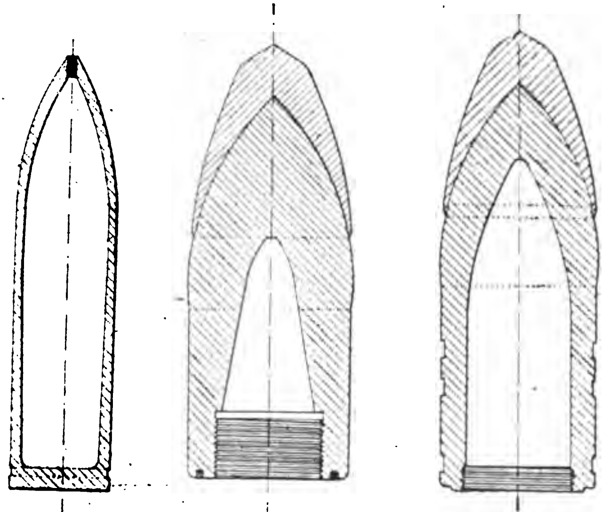


Fig. 138 à 140. — Obus allongé d'un canon français. Obus de rupture français. Obus de semi-rupture français.

vitesse zéro passe, en un millième de seconde peut-être, à une vitesse de plusieurs centaines de mètres, si nous considérons une section transversale, la partie du projectile située en arrière de cette section reçoit du culot de l'obus une forte accélération et transmet cette accélération à la partie avant qui est immobile. Si les parois ne sont pas suffisamment épaisses pour résister à ce choc, il se produit ce que l'on appelle en artillerie « l'avalement » de la partie

avant, qui s'écrase sur le culot. C'est pour que le métal ne travaille pas à une compression exagérée que l'on détermine l'épaisseur des parois, tout au moins en ce qui concerne le corps de l'obus.

Dans l'artillerie navale, le problème change : ce n'est plus

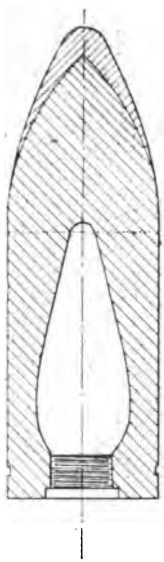


Fig. 141. — Obus anglais de rupture.

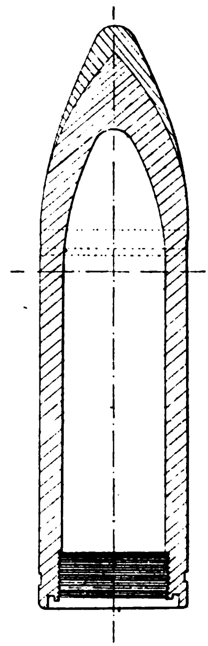


Fig. 142. — Obus anglais de semi-rupture.

contre du personnel ou des blindages moyennement résistants qu'il faut tirer, mais contre des blindages et des cuirasses d'acier extra-dur, de 20 à 30 centimètres d'épaisseur.

Ces blindages, d'abord constitués par des plaques de fer, ont été ensuite façonnés en aciers spéciaux (au nickel, au chrome), puis en acier compound (plaque extérieure cémen-

tée, plaque intérieure en acier doux), puis enfin en acier extérieurement cémenté (Harwey, Krupp, Charpy).

L'obus a d'abord été en fonte ou en acier, chargé en poudre ou en mélinite et *amorcé à l'ogive,* employé concurremment avec un obus en acier dit *obus de rupture,* à parois très épaisses et à ogive massive trempée.

Le premier renferme 10 p. 100 de son poids en explosif, le second à peine 2 p. 100, la capacité en explosif étant sacrifiée au pouvoir perforant dans le premier, l'inverse ayant lieu pour le second.

L'obus en acier n'a pas tardé à supplanter l'obus en fonte. Vint ensuite l'obus coiffé.

La coiffe consiste en une calotte d'acier trempé d'une nuance plus douce que l'acier de l'ogive de l'obus ; elle a été introduite par l'amiral russe Makharoff. Il observa qu'on entamait plus facilement un blindage cémenté s'il était recouvert d'une plaque d'acier doux. Quand l'obus doit entamer la lutte avec une plaque plus résistante, on entoure sa tête d'un bandage en acier dont le rôle est de désorganiser la première couche cémentée et de permettre à l'ogive du projectile, restée intacte, de traverser les couches suivantes.

L'obus de *semi-rupture,* doué d'un pouvoir perforant considérable, quoique inférieur à celui de l'obus de rupture, renferme cependant un poids d'explosif plus considérable : 5 à 6 p. 100.

En aviation, où les efforts supportés par le projectile qui est abandonné en chute libre sous l'action de son propre poids sont infiniment moins grands, on en vint à amincir les parois, à ne leur donner que juste l'épaisseur nécessaire pour qu'à l'arrivée au sol l'obus ne s'écrase pas. On a ainsi des projectiles contenant jusqu'à 50 p. 100 de leur poids en explosif. Mais alors il faut que ce dernier puisse détoner

dans un récipient à parois minces, ce qui a nécessité l'étude de nouveaux explosifs excessivement brisants.

Ajoutons, pour terminer, qu'afin d'augmenter la portée des obus on les a munis de coiffes ou fausses ogives coniques formées par une enveloppe en tôle soudée à l'autogène, que l'on visse sur le corps de l'obus, et qui allonge notablement l'ogive.

Les principales poudres de guerre. — Nous donnons dans le tableau ci-dessous, à titre d'indication, la nomenclature de quelques poudres types en usage dans l'armée française avec, en regard, la forme sous laquelle elles se présentent.

	POUDRES.	DESCRIPTION.	EMPLOI.
Poudres à canon.	Poudre F_3. Poudre MC_{30}.	Grains anguleux.	Charge intérieure des obus.
	Poudre C (1, 2).	Grains plats.	Canon de 90.
	Poudre S. P. (1, 2).	Grains plats et réguliers de 9^{mm},7 à 13^{mm},7 d'épaisseur.	Canons modèle 1875.
	Poudres A (8/11, 13/20, 26/34, 3/40	Grains plats et réguliers d'épaisseur variable.	Canons de 27, modèle 1870.
	Poudre PA (prismatique noire).	Grains réguliers hexagonaux percés d'un canal central. Côté de l'hexagone 2 mm. Hauteur 24 à 25 cm. Diamètre du trou 10 mm.	Sachets d'allumage des gargousses chargées en PB.
Poudres PB (2 ou 3) (primastique brune).		Même forme que les poudres PA.	Canons de 19, 24, 32.
Poudres sans fumée.	Poudre BF. — BN_3F.	Grains plats et carrés.	Cartouche du fusil 1886.
	Poudre BC. — BS.	Bandes striées légèrement translucides.	Canon de 115-95.
	— BSP.	Bandes striées brunes.	Canon de 75.
	— BM.	Bandes non striées,	Gros canons.

LA DISPERSION DU TIR

Si l'on tire plusieurs coups de canon dans les mêmes conditions atmosphériques, avec la même pièce exactement pointée dans la même direction, et avec des projectiles aussi identiques que possible, on constate que les points d'impact sont nettement différents. Si l'on tire un grand nombre de coups, on distingue une région où les coups arrivent en plus grand nombre, tandis qu'autour de cette région ils se disséminent d'autant plus qu'on s'éloigne plus du *point moyen*, qui est le point autour duquel les coups sont le plus serrés.

L'*écart moyen*, en portée, en direction ou en hauteur, est la moyenne des écarts en portée, en direction ou en hauteur par rapport au point moyen. D'après ce que nous venons de dire, on voit que la dispersion du tir se ramène immédiatement à un calcul de probabilités. Nous allons donner quelques-uns des résultats que la pratique a vérifiés.

Dispension et calcul des probabilités. — Supposons que l'on élève sur la droite joignant le point moyen à la pièce (qui est la direction du tir) deux droites perpendiculaires limitant, l'une, la meilleure moitié des coups courts (c'est-à-dire tombés entre la pièce et le point moyen), l'autre, la meilleure moitié des coups longs (c'est-à-dire ceux tombés au delà du point moyen), la distance qui sépare ces deux droites est l'*écart probable* en portée. Cet écart est lié à l'écart moyen dont il a été question plus haut par la relation :

$$\text{Écart probable} = \text{écart moyen} \times 0{,}8453.$$

Les tables de tir complètes donnent, pour chaque canon et pour chaque distance, les écarts probables en direction, en portée et en hauteur.

Ceci étant posé, on appelle *probabilité d'un écart*, dans un tir qui comprend un grand nombre de coups, le rapport au nombre total des coups tirés, du nombre de fois qu'un écart égal à l'écart considéré s'est produit.

L'étude des lois de la dispersion a permis de dresser un tableau qui indique les probabilités d'avoir un écart inférieur à n fois l'écart probable. Nous en donnons un extrait ci-après :

n.	Probabilité p. 100.	n.	Probabilité p. 100
0,00	0,00	2,1	84,34
0,05	0,26	2,2	86,22
0,1	5,38	2,25	87,09
0,2	10,73	2,3	87,92
0,25	13,39	2,4	80,45
0,3	16,04	2,5	90,83
0,4	21,27	2,6	92,05
0,5	26,41	2,7	93,14
0,6	31,43	2,75	93,64
0,7	36,32	2,8	94,11
0,75	38,71	2,9	94,95
0,8	41,05	3	95,70
0,9	45,62	3,1	96,35
1	50,00	3,2	96,91
1,1	54,19	3,25	97,16
1,2	58,17	3,3	97,40
1,25	60,08	3,4	97,82
1,3	61,94	3,5	98,18
1,4	65,50	3,6	98,48
1,5	68,83	3,7	98,74
1,6	71,95	3,8	98,95
1,7	74,85	3,9	99,15
1,75	76,21	4	99,30
1,8	77,53	4,2	99,54
1,9	80	4,4	99,70
2	82,27	4,6	99,81
		4,8	99,88
		5	99,93

e étant l'écart probable de la pièce, a la largeur du but, le rapport n est égal à $\frac{a}{2e}$. En lisant le nombre correspondant dans le tableau, on a la probabilité p cherchée.

Donnons un exemple concret. Supposons qu'il s'agisse

d'atteindre à 4 000 mètres, avec un canon de 120, un emplacement de 10 mètres sur 8 mètres.

A 4 000 mètres, les écarts probables du canon de 120 sont $9^m,70$ en portée et $1^m,10$ en direction.

Pour l'écart en portée dans le cas particulier que nous considérons, la valeur de n est $\frac{10}{2 \times 9,7} = 0,5$, d'où, d'après le tableau, $p = 26,41$.

Pour l'écart en direction, $n = \frac{5}{2 \times 1,1} = 2,27$, d'où $p' = 87,43$

La probabilité cherchée est $= \frac{p \times p'}{100} = 23,5$.

C'est dire que sur 100 coups de canon, tirés dans les meilleures conditions et dont le point moyen est au centre du rectangle considéré, 23 seulement auront chance d'atteindre le but.

On comprend ainsi la consommation d'obus nécessaire pour démolir une redoute ou un abri de mitrailleuse.

Nous donnons ci-dessous, à titre d'indication, quelques écarts probables en portée, direction et hauteur du canon de 95 tirant un obus de 12 kilos à la vitesse initiale de 418 mètres par seconde :

	Écart probable en mètres		
Portée.	en hauteur.	en portée.	en direction.
1 000 mètres...........	0,3	6,9	0,3
2 000 —	0,7	7,2	1
3 000 —	1,3	7,7	2,1
4 000 —	2,7	10,6	3,4
5 000 —	6,1	16,4	4,9
6 000 —	13,4	26	6,9
7 000 —	28,6	40	10
8 000 —	62,6	58,4	14,9

Les écarts probables inscrits dans les tables de tir résultent d'expériences faites dans des conditions de précision spéciales et avec des pièces neuves. Aussi, dans les tirs de guerre,

où les conditions sont toutes différentes, ne peut-on compter sur les mêmes résultats : la zone de dispersion est plus étendue et les écarts probables plus grands que ceux indiqués dans les tables.

On admet qu'en pratique les écarts probables sont une fois et demie ceux donnés dans les tables.

On appelle *régime d'une pièce* par rapport à une autre, prise comme terme de comparaison, les différences entre la position des points moyens et entre l'étendue des zones de dispersion. Il faut en tenir compte surtout lorsque, dans une batterie en service depuis longtemps, les pièces ont été inégalement fatiguées et que les tubes des canons sont à des points d'usure différents.

Le tir fusant. — Dans le tir des obus à shrapnells, on peut admettre que les balles, au moment de l'éclatement, se dispersent à l'intérieur d'un cône dont l'axe correspond à la tangente à la trajectoire au point d'éclatement et qu'elles se répartissent à peu près uniformément à l'intérieur de ce cône.

La surface suivant laquelle elles rencontrent le sol est donc la section oblique d'un cône : c'est, d'après les théorèmes classiques de géométrie, une ellipse dans les cas où l'angle de chute est supérieur à la moitié de l'ouverture de la gerbe.

Le tableau suivant donne la demi-ouverture de la gerbe pour quelques canons aux différentes distances.

DISTANCES.	CANON DE :		
	75 centim.	95 centim.	155 centim.
2.000	8°,57	8°,55	10°,10
2.000	10°	9°,29	10°,34
4.000	10°,51	9°,58	10°,56
5.000	11°,35	10°,18	11°,14

Comme on le voit, l'ouverture de la gerbe augmente avec la distance. C'est qu'en effet la force centrifuge a une influence d'autant plus grande que la portée est elle-même plus grande.

La figure 143 représente la zone battue par un shrapnell de 155. Elle forme une ellipse dont le grand axe a 190 mètres.

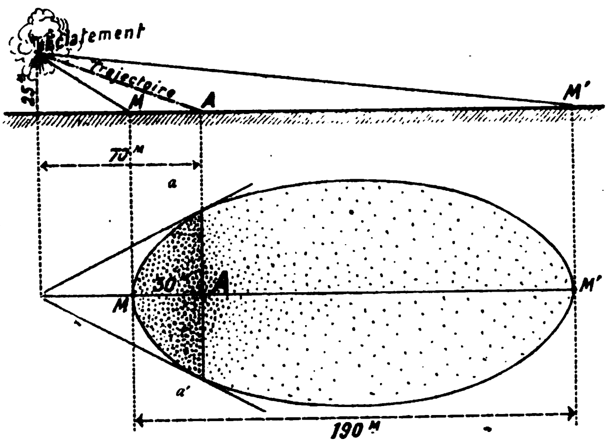


Fig. 143. — La zone de dispersion d'un des shrapnells.

Le point A est le point de rencontre de la trajectoire avec le sol et, d'après ce que nous venons de dire, la moitié des balles se trouve dans l'espace compris entre *aa'* et M dont la longueur est de 30 mètres seulement, et l'autre moitié se répartit sur la surface *aa'*M' dont la longueur est de 160 mètres. Si donc le coup est trop long de 30 mètres, le projectile est inefficace, tandis que s'il est trop court de 30 mètres, l'efficacité n'est pas sensiblement diminuée.

C'est ce qui explique pourquoi on a toujours intérêt à exécuter un tir fusant avec une trajectoire moyenne courte.

LA RECHERCHE DES OBUS NON ÉCLATÉS

Les champs de bataille modernes, que l'artillerie arrose de projectiles de tous calibres, seront, après la guerre, de véritables mines de fer, mais où malheureusement, parmi les débris inertes, se trouveront aussi des obus non éclatés, soit que le terrain trop mou dans lequel ils se sont enfoncés ait amorti leur chute, soit que la fusée, pour une cause quelconque, n'ait pas percuté. Or si, en temps normal, une fusée d'obus ne peut détoner spontanément, il n'en est plus de même lorsque l'obus qui la porte a été tiré. Les sécurités ont fonctionné, la masselotte qui vient par son choc faire détoner le fulminate est libre. Un choc, ou un déplacement fortuit, peut les faire percuter, déterminant l'éclatement de tout l'obus.

Il est donc de toute nécessité, lorsque l'avance de nos troupes permet de rendre à l'agriculture le sol foulé par les ennemis, de procéder à un nettoyage minutieux, à l'élimination de toute la ferraille qui jonche le sol et de tous les obus non éclatés qui s'y trouvent mêlés. (Les Allemands ont en effet des fusées d'obus dont le non-fonctionnement est fréquent.)

Méthode Gutton. — M. Gutton a réalisé dans ce but une balance d'induction qui, expérimentée en Meurthe-et-Moselle sur les terres reconquises du Grand Couronné, a donné les meilleurs résultats.

Cette balance d'induction se compose de deux bobines plates A_1 et B_1 montées en série sur le même circuit et que parcourt un courant alternatif induisant deux bobines voisines A_2 et B_2 également en série. Dans ces dernières, les enroulements sont tels qu'à chaque instant les forces électromotrices s'y trouvent respectivement de sens contraire.

Les bobines mesurent 70 centimètres de diamètre ; leurs fils s'enroulent à raison de 20 tours pour le primaire et de 10 seulement pour le secondaire, sur de simples cercles de tamis dont deux traverses rectangulaires assurent la rigidité.

Si les deux couples de bobines A_1, B_1 d'un côté et A_2, B_2, d'autre part, étaient exactement identiques, les forces élec-

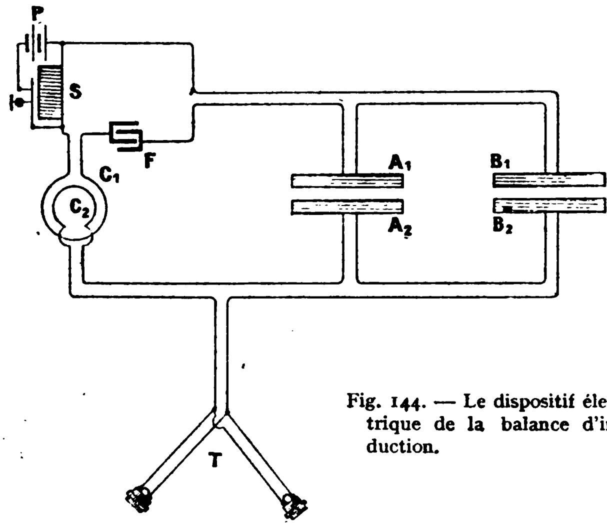


Fig. 144. — Le dispositif électrique de la balance d'induction.

tromotrices se compenseraient et le téléphone T, mis en circuit avec A_1 et B_2, demeurerait silencieux. Mais, vu l'impossibilité d'obtenir l'identité parfaite de ces deux couples de bobines, M. Gutton adjoint à l'appareil un système de réglage capable de neutraliser l'induction mutuelle des deux circuits primaire et secondaire. Il suffit pour cela de disposer sur chacun des circuits une petite bobine de 4 tours de fil ; l'une de ces bobines, C_2, tourne à l'intérieur de l'autre, C_1, autour d'un diamètre commun. Cette rotation, en modifiant l'induction mutuelle des deux circuits, permet de régler la balance, au moment même de s'en servir. Quand une masse

de fer se trouve au voisinage de l'un des couples de bobines, elle crée une dissymétrie qui empêche la compensation, le téléphone rend un son. Grâce à cet appareil, on peut facilement déceler la présence de l'obus de 77 à une profondeur de 40 centimètres, profondeur moyenne des labours.

Quand on veut procéder à la recherche des obus sur le

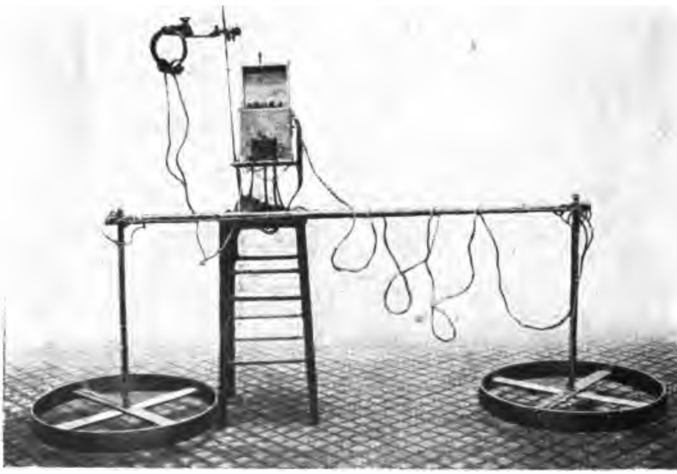


Fig. 145. — Nouvelle balance d'induction construite par le Pr Gutton pour rechercher les obus non éclatés dans les champs.

terrain, on fixe les deux bobines à deux bâtons verticaux reliés eux-mêmes aux extrémités d'un bambou horizontal, qu'un homme porte par le milieu. On a soin d'attacher les fils qui viennent des bobines d'un côté aux bornes du bambou, puis de les connecter convenablement d'autre part avec le téléphone et l'appareil de réglage. L'aide parcourt ensuite le champ à explorer en soulevant, un peu au-dessus du sol, les deux couples de bobines de la balance, tandis

que l'observateur, coiffé du casque téléphonique et ayant passé en bandoulière la boîte contenant la pile, le conden-



Fig. 146. — Recherche des obus sur le terrain au moyen de la balance du Pr Gutton.

sateur, le trembleur et le système de réglage, le suit à quelques mètres en arrière, comme le montre la figure 146.

V

LA MÉCANIQUE

Les applications de la mécanique ont été innombrables pendant la guerre. Depuis les arbalètes permettant, grâce à la forme spéciale du ressort, de lancer une grenade à 200 mètres, jusqu'aux canons pneumatiques de tranchée, en passant par les tanks, les appareils à creuser les tranchées, à couper les fils de fer, etc., la liste est presque illimitée. Nous n'entreprendrons pas ici de donner même un aperçu succinct sur tous les engins utilisés et nous nous contenterons d'étudier deux problèmes qui ne sont guère connus que des spécialistes.

LES AFFUTS DES CANONS

L'étude du recul des canons est une des questions les plus importantes qu'aient à résoudre les artilleurs.

D'après les lois de la mécanique, lorsque l'obus part, le tube-canon est lancé violemment en sens inverse avec une vitesse telle que le centre de gravité de l'ensemble constitué par l'obus et la pièce elle-même reste toujours au même point de l'espace. C'est dire que, si la pièce avait la même masse que le projectile, elle serait projetée en sens inverse de ce dernier et avec la même vitesse. Si le canon pèse 100 fois plus lourd que le projectile et si celui-ci a une vitesse initiale de 500 mètres par seconde, la vitesse de recul est, au début, de 5 mètres à la seconde. Ceci théoriquement et dans le vide.

En pratique et sans rien supposer sur la valeur de la vitesse de recul, le tube-canon est animé en sens inverse du tir d'une énergie de mouvement qu'il importe d'absorber sans que l'ensemble de la pièce subisse un choc capable de la dépointer. C'est le problème des affûts.

Affûts rigides. — On peut le résoudre de deux façons : soit en donnant à l'affût une masse telle que l'énergie qui lui est communiquée au départ du coup ne produise qu'une accélération très petite (affûts rigides), soit au contraire en absorbant cette énergie dans des freins ou des récupérateurs (canons à recul sur l'affût).

Les affûts rigides, supportant intégralement les percussions du tir transmises directement par la bouche à feu, doivent être particulièrement résistants. Grâce aux progrès réalisés après 1870 dans la fabrication de l'acier, on était arrivé à faire produire à ces affûts le rendement maximum ; mais leur poids, forcément élevé, ne permettait pas de donner aux matériels de campagne une mobilité suffisante.

En outre, la manœuvre était pénible et lente, par suite du recul de l'affût, qui nécessitait à chaque coup un déplacement à bras sur une longueur variable de 1 à 2 mètres suivant les terrains.

C'est seulement après la guerre russo-turque de 1878, lorsque la poudre sans fumée et les perfectionnements apportés dans la fabrication des projectiles ramenèrent en faveur la question de la rapidité du tir, que l'on se rendit compte qu'il fallait éviter le recul et rendre la pièce stable pendant le tir. Le premier canon de campagne réellement à tir rapide, qui, par sa complète stabilité au tir, assurait la permanence du pointage, est le canon français de 75 modèle 1897.

Le principe sur lequel sont basés les matériels à tir rapide actuels est le principe du long recul du canon sur l'affût.

Un lien élastique (frein hydraulique avec récupérateur), interposé entre le berceau et le canon, ne transmet plus au berceau et par suite au pivot, au lieu d'une percussion, qu'un effort très atténué, dont la grandeur dépend de la longueur admise pour le recul.

La fixité de l'affût. — Avec les matériels de campagne appelés à des déplacements fréquents et rapides, il faut d'abord réaliser la fixité d'un point de l'affût. On a eu recours au dispositif imité des affûts à croc du XVe siècle, qui consiste à fixer l'affût au sol au moyen d'une bêche de crosse s'enfonçant par l'effet même du tir. La bêche a reçu une

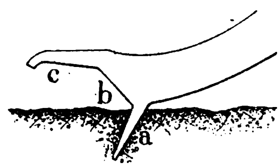


Fig. 147. — La bêche de crosse.

forme rationnelle qui lui assure une fixité absolue après qu'elle a pénétré dans le sol sous l'effet du premier coup. La fourche d'appui *b* est sensiblement normale à la résultante des efforts supportés par la crosse dans le tir, et le patin *c* comprime le sol et empêche la terre de se soulever sous l'action du soc *a*. Pour augmenter l'adhérence et aussi pour permettre un champ de tir angulaire plus vaste, dans le matériel Deport italien la flèche de l'affût est double.

Affût Engelhardt. — Quelle était la situation avant l'invention, par le colonel Deport, du long recul? La première réalisation pratique d'un affût à déformation est due au colonel russe Engelhardt en 1876. La masse choquante a une valeur très considérable par rapport à la masse totale de l'ensemble. Cette masse comprend le canon et les flasques, tan-

dis que la pointe qui reçoit le choc comprend simplement l'essieu et les tirants le reliant aux flasques par l'intermédiaire de tampons élastiques en caoutchouc. Au départ du

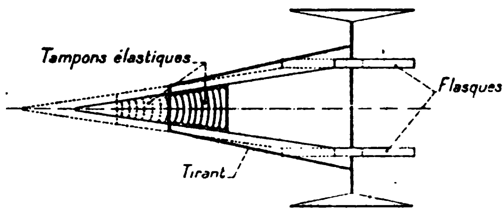


Fig. 148. — Affût Engelhardt. En pointillé, la position de l'affût après recul.

coup, les flasques reculent par rapport à l'essieu en comprimant le caoutchouc, puis l'essieu et les roues roulent à leur tour. Le recul se trouve ainsi réduit à $0^{m},50$ environ. A la fin du recul, les flasques sont ramenées à leur position normale par rapport à l'essieu.

Affût Canet. — Dans l'affût Canet pour canon de 75

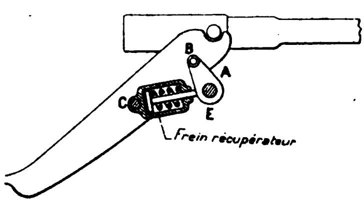


Fig. 149. — Affût de 75 de campagne système Canet.

(1889), les flasques sont reliées à l'essieu au moyen d'un manchon A et d'un frein hydraulique avec récupérateur à ressorts.

On obtient ainsi un triangle articulé BEC dont deux côtés ont une longueur fixe et dont le troisième est constitué par

la pièce. L'affût est muni d'un frein de roues, mais n'a pas de bêches.

Le même ingénieur, dans un autre type d'affût (1895), compose la flèche de deux tubes emboîtés l'un dans l'autre et constituant dans leur ensemble un frein hydropneumatique; dans ce système, la masse reculante comprend la plus grande partie de l'affût, à l'exception du tube plongeur A.

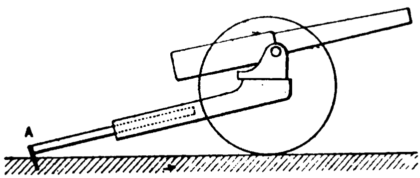


Fig. 150. — Affût télescopique système Canet 1895.

Quels que soient les inconvénients évidents de ces affûts, comme le recul n'était que de quelques centimètres, le dépointage était facile à corriger et la rapidité du tir pouvait atteindre 5 à 6 coups à la minute : ils permettaient donc un tir accéléré.

Frein hydropneumatique. — C'est dans les canons de 120 court et de 155 court modèles 1890 qu'apparaît pour la première fois le frein hydropneumatique et le récupérateur à air, dus au colonel Locard, de Bourges, qui plus tard, en 1897, dans les mains du colonel Deport, devaient assurer le succès du 75.

Un frein hydropneumatique se compose d'un corps de pompe en acier relié au canon, d'un réservoir à air ou récupérateur en bronze, d'une tige et d'un piston solidaires du récupérateur.

La tige est creuse, munie de larges ouvertures près du piston. A son débouché dans le réservoir, le trou central est

fermé par une soupape. Un ***diaphragme***, ou piston mobile, sépare le liquide de l'air comprimé, dont la pression initiale est de 110 atmosphères.

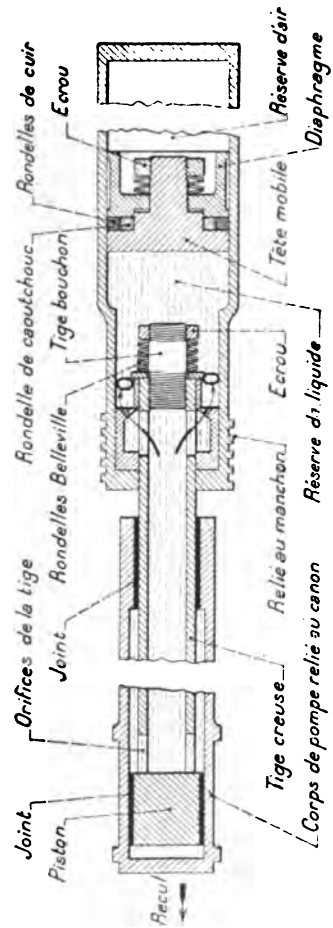


Fig. 151. — Schéma d'un frein hydropneumatique.

Le corps de pompe recule avec le canon. A la fin du recul, la détente de l'air fait rentrer le liquide dans le corps de pompe par deux orifices O ménagés autour de la soupape

qui, par contre, est fortement appliquée sur son siège, et le canon revient à sa position normale. Le récupérateur dont nous venons de parler a pour but d'emmagasiner une partie de l'énergie de recul sous une forme qui permette de l'utiliser pour ramener ensuite rapidement le canon à sa position normale, tandis que le frein hydraulique détient une partie



Fig. 152. — Un canon allemand antiaérien.

Remarquer la disposition triangulaire de l'affût et des deux roues.

de l'énergie de recul en la transformant en chaleur.

La répartition entre ces deux organes de l'énergie totale à absorber doit, d'une part, être juste suffisante pour vaincre le travail des résistances au retour en batterie, car l'excédent est nuisible et se traduirait par un choc pouvant amener le dépointage ; d'autre part, il y a lieu de donner au travail du frein le plus d'importance possible, car cet organe fait seul office de régulateur. Aussi est-on forcé d'adjoindre au frein de recul un frein modérateur.

Dans le frein hydropneumatique que nous avons décrit, la modération du recul se fait grâce aux diamètres différents des orifices des soupapes. — Lorsqu'on a voulu appliquer, vers 1900, le principe du long recul aux canons de montagne, une difficulté nouvelle se présenta. Les canons de montagne doivent pouvoir tirer sous de grands angles et, d'autre part, être très bas sur affûts (0m,60 à 0m,80) pour réduire le poids. Si l'on adopte un recul de 1 mètre, par exemple, il est à craindre que la culasse ne vienne rencontrer le sol sous les fortes inclinaisons. On a envisagé, pour remédier à cet inconvénient, plusieurs solutions : essieu coudé, recul automatique variable avec l'angle de tir, enfin, et c'est la solution adoptée pour le canon de montagne de 65 français (1908) et les matériels Schneider et Deport, le lancer du canon.

Le lancer du canon. — Le principe du lancer est le suivant : on communique à la bouche à feu une certaine vitesse

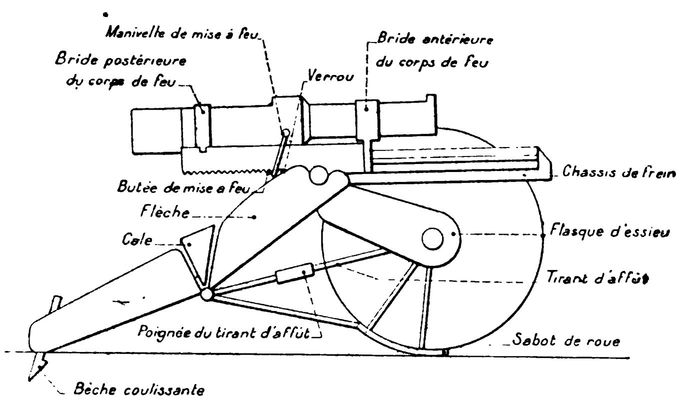


Fig. 153. — Schéma de l'affût du 65 de montagne.

vers l'avant et on produit les déflagrations. Voici comment fonctionne le canon de montagne de 65. L'affût comprend deux flasques d'essieu articulées aux tourillons avec une flèche

elle-même composée de deux parties articulées entre elles à l'axe de charnière. La portée de cette dernière articulation est assurée au moyen de cales qui permettent de raccourcir ou d'allonger l'affût en agissant sur le tirant d'affût et en modifiant l'inclinaison des deux pièces articulées. L'angle de tir peut ainsi varier de 24 à 35°.

Un châssis à tourillon relié à l'affût par une vis double supporte le frein hydraulique et un récupérateur double formé par deux ressorts télescopiques disposés à droite et à gauche du cylindre de frein. Enfin une crémaillère, placée sous le cylindre de frein, permet d'immobiliser, au moyen d'un verrou, la masse reculante à sa position de tir.

Ainsi disposé, le canon est à l'armé et les ressorts du récupérateur bandés. En dégageant le verrou par l'intermédiaire d'un levier de mise de feu, le canon est lancé vers l'avant et la mise de feu a lieu automatiquement au moment où le marteau est actionné par la butée de mise de feu fixée au châssis ; à la fin du recul, le canon est arrêté par le verrou qui s'engage dans une dent de la crémaillère. Le tir terminé, la force vive du canon lancé vers l'avant produit l'arrachement de la bêche.

Il faut, naturellement, avant le tir, effectuer une manœuvre à bras pour faire reculer le canon et l'amener à sa position de tir en bandant les ressorts du récupérateur.

Les récupérateurs que nous venons de décrire sont à air ; mais, dans la plupart des artilleries étrangères (allemande, autrichienne, russe) on emploie des récupérateurs à ressort, presque toujours en hélice en acier au tungstène, ou au silicium à fil rond ou rectangulaire. On n'emploie d'ailleurs jamais un ressort unique, mais une série de ressorts (deux en général) enfilés l'un dans l'autre (canons de marine). Les deux ressorts, dont les diamètres d'enroulement sont différents, travaillent parallèlement en ajoutant leurs résistances,

et subissent le même aplatissement. On utilise aussi des ressorts télescopiques, dont l'encombrement est très réduit et qui servent surtout dans la marine.

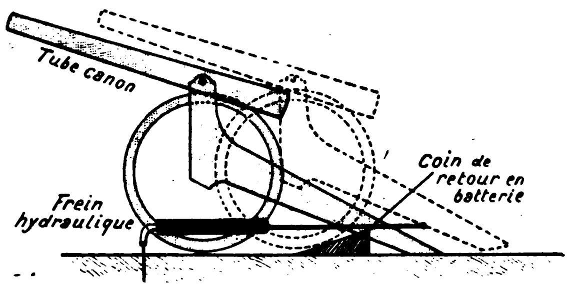


Fig. 154. — Fonctionnement des affûts rigides.

Affûts de l'artillerie lourde. — Dans l'artillerie lourde à grande puissance dont le développement et l'importance

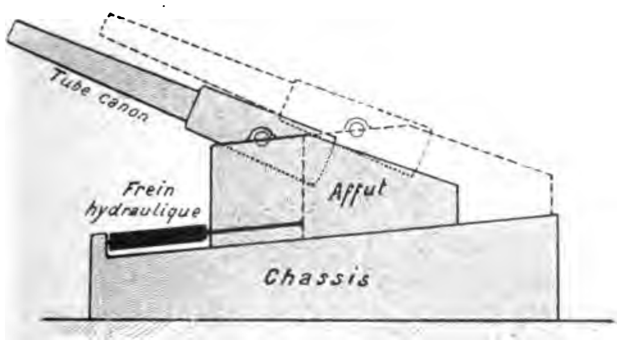


Fig. 155. — Le fonctionnement des affûts à châssis rigide.

ont été si considérables au cours de la guerre actuelle, les pièces peuvent être montées soit sur affût rigide, soit sur affût à châssis, soit sur affût à recul du tube.

Dans les affûts rigides, toutes les parties de la pièce reculent solidairement, et l'on s'est borné à limiter le recul

et à le canaliser. C'est ainsi que, lorsqu'on emploie des plates-formes, un frein hydraulique retient la pièce qui cependant

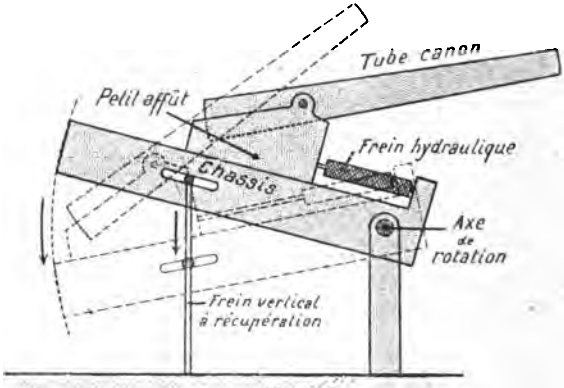


Fig. 156. — Fonctionnement des affûts à châssis système Piégné-Canet.

recule et les roues montent sur des coins qui assurent le retour automatique en batterie sous l'influence de la pesanteur.

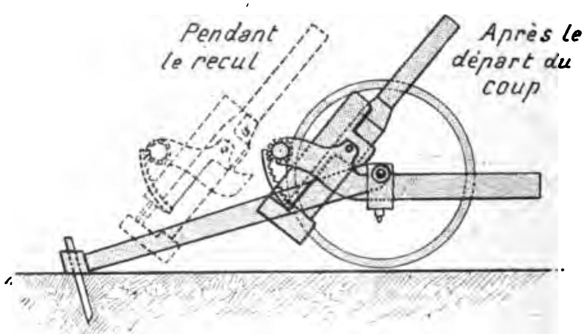


Fig. 157. — Schéma du fonctionnement des affûts rigides système Deport.

C'est ainsi que fonctionnent les canons de 155, 240, 320.

Dans le système à châssis, l'affût recule sur un châssis en pente, disposé de telle façon que le centre de gravité

tende à s'élever, ce qui, joint à l'action de freins, limite le recul. Les canons de 155 modèle 1891, 220 modèle 1891, 270, 305 modèle 1893 et 370 ont des affûts de ce système.

Le recul du tube est bien connu dans les pièces de campagne, puisque c'est lui qui fait l'originalité du 75 : nous en

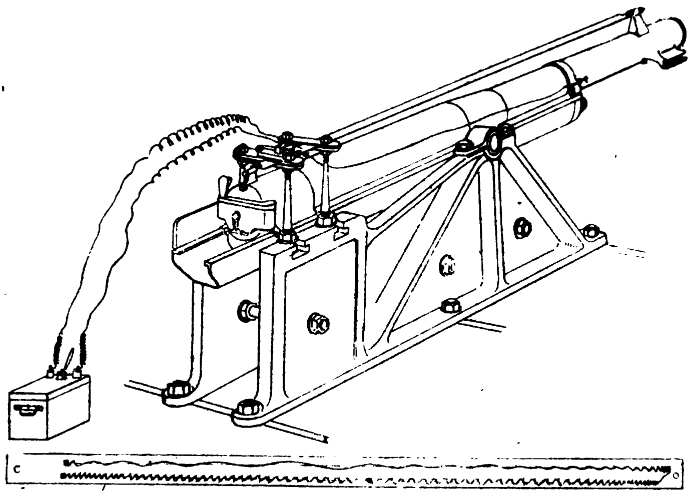


Fig. 158. — Installation d'un canon pour les mesures au vélocimètre. Vue du vélocimètre et diagramme de recul et de rentrée en batterie.

avons donné plus haut le principe; mais, dans l'artillerie lourde où les reculs seraient excessifs, et surtout dans les canons montés sur trucks qui, si on n'amortissait pas le recul vertical, démoliraient très rapidement les voies, on décompose parfois le recul dans deux directions choisies.

C'est ainsi que les affûts type Peigné, Canet, en usage particulièrement pour le 120 long et le 155 court en France, et en Amérique pour les grosses pièces de côte, sont constitués par un affût à châssis, mais dans lequel le châssis est mobile autour d'un axe horizontal, de sorte qu'il s'abaisse pendant

le recul, en comprimant un frein hydraulique vertical à récupérateur qui remonte ensuite le châssis à sa position normale, tandis que la pesanteur ramène l'affût en batterie.

Un second exemple est fourni par le canon de 75 italien dû au colonel Deport, dans lequel on utilise deux freins, l'un horizontal à course de 1 mètre environ, et l'autre, d'inclinaison variable, à course de 36 centimètres seulement. Au moment du tir, le canon recule dans la direction de son axe sur le berceau, et le berceau lui-même recule horizontalement avec

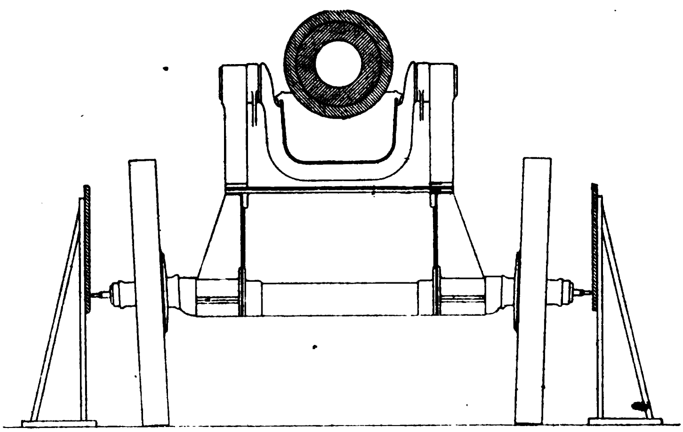


Fig. 159. — Installation des panneaux pour la détermination des soulèvements, du recul et du lancer.

le traîneau qui le supporte. Le recul terminé, deux ressorts à boudin ramènent le canon à sa place.

Nous venons de voir comment on cherchait à réaliser la stabilité de la pièce pendant le tir et sa remise en batterie aussi exacte que possible.

Il nous reste à dire un mot des méthodes physiques employées pour évaluer la plus ou moins bonne réalisation des conditions précédentes.

Mesure de la stabilité des affûts et du fonctionnement des freins. — Pour vérifier la stabilité des affûts, on dispose sur les essieux des roues une pointe traçante en face de laquelle on place, dans un plan vertical parallèle à l'axe de la pièce, un panneau enduit de peinture fraîche à la céruse sur lequel la pointe, maintenue au contact par des ressorts, trace, si l'affût se déplace pendant le tir, une courbe qui donne tous les éléments du déplacement (soulèvement, recul, lancer, etc.).

Pour la détermination de la vitesse de recul et de retour

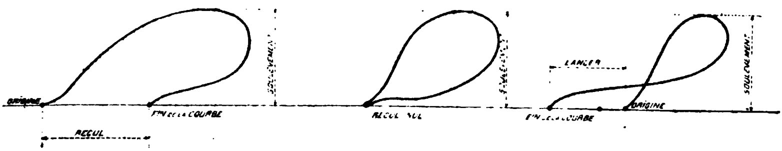


Fig. 160. — Diagrammes tracés sur les panneaux par les aiguilles de soulèvement.

en batterie, on se sert d'un vélocimètre, pour l'emploi duquel il faut installer la bouche à feu sur un affût fixe. Cet instrument, qui enregistre un phénomène dont la durée est de l'ordre du 1/100e de seconde, se compose essentiellement d'un diapason entretenu électriquement, monté sur l'affût fixe, et dont les vibrations sont enregistrées sur une lame d'acier enduite de noir de fumée, reliée à la partie reculante et se déplaçant devant la pointe traçante du diapason. Les vibrations du diapason ont une durée connue. En examinant les courbes de recul et de rentrée en batterie séparées grâce à un système spécial de décalage, on a tous les renseignements désirés sur le fonctionnement du frein.

LE GYROSCOPE ET SES APPLICATIONS

Le gyroscope fut imaginé par Foucault vers 1850, pour mettre en évidence le mouvement propre de rotation de la terre. Au point de vue mécanique, son étude se ramène à celle d'un corps tournant autour d'un axe, et il permet de suivre pas à pas et de vérifier toutes les propriétés extrêmement curieuses que révèlent les équations mathématiques. Mais le gyroscope n'est pas simplement un appareil de laboratoire ou un jouet bon tout au plus à distraire pendant quelques jours la curiosité des enfants ; c'est, grâce à ses remarquables propriétés, un instrument mécanique des plus précieux et dont les applications sont de jour en jour plus nombreuses.

Phénomènes gyroscopique . — Avant de les passer en revue, nous allons décrire les expériences qui mettent en évidence ses principales propriétés.

Les phénomènes gyroscopiques sont présentés par tous les corps tournants, mais sont surtout apparents dans ceux ayant un grand « moment d'inertie angulaire », comme c'est le cas pour une roue très lourde tournant à grande vitesse autour de son moyeu... Considérons donc un tore très pesant monté sur un pivot comme celui de la figure 161 par exemple. Si on le fait tourner rapidement sur lui-même, on constate que son axe décrit approximativement un cercle ou, plus exactement, semble rouler sur un cône, le sens dans lequel est décrit ce cône étant soit celui de rotation de la masse gyroscopique, soit le sens inverse, suivant la position du pivot par rapport au centre de gravité de la masse en révolution (fig. 161 et 162). Ce mouvement de l'axe, qu'on appelle la « précession », est dû, comme nous le verrons, à l'action de la pesanteur.

Une expérience très simple à réaliser avec les petits gyroscopes-jouets du commerce permet de mettre en évidence d'une façon très frappante le changement de sens de la précession suivant la position du centre de gravité. A cet effet, soudons

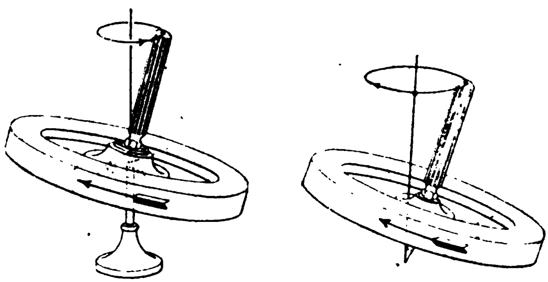


Fig. 161 et 162. — Principe du gyroscope.

au gyroscope courant, que l'on appelle parfois gyroscope de Wheatstone, une tige sur laquelle est fixé un contrepoids formé par un cornet dont la capacité est telle que, plein de sable, il amène le centre de gravité du même côté que lui de

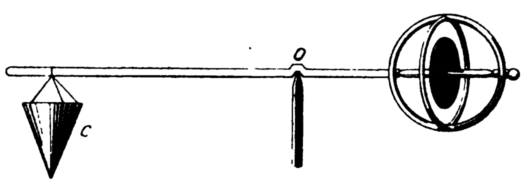


Fig. 163.

l'axe de suspension O et que le centre de gravité passe de l'autre côté quand le cornet est vide (fig. 163).

On le remplit, on lance le gyroscope, on abandonne le système à lui-même tout en laissant le sable s'écouler. La précession qui était dans un sens diminue, s'annule, change de sens et croît au fur et à mesure que le cornet se vide. La

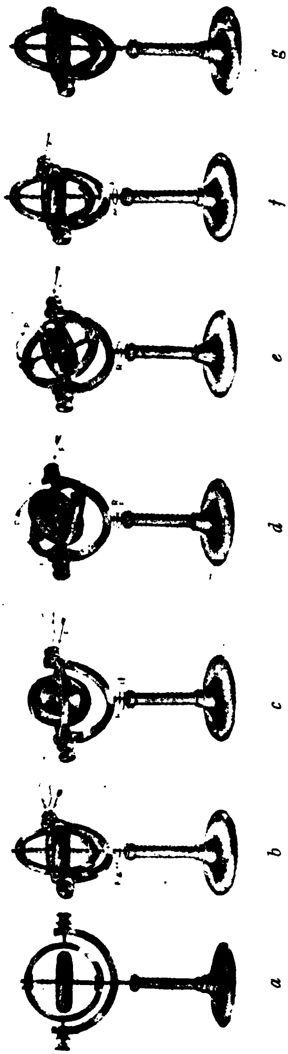


Fig. 164.

précession est une des propriétés fondamentales du gyroscope, l'autre, ainsi que nous le verrons, étant sa fixité dans l'espace ; aussi allons-nous décrire quelques expériences faciles à reproduire qui permettent d'en comprendre la nature.

Lorsque le plan contenant la force extérieure que l'on fait agir sur le gyroscope coïncide avec le plan de rotation de la roue (fig. 164, *b*) et que l'axe de rotation est vertical, le gyroscope obéit à l'impulsion et sa rotation autour de l'axe vertical de son support n'est accompagnée d'aucun changement dans le phénomène : il n'y a pas de précession.

Si, au contraire, l'axe du gyroscope est disposé horizontalement (fig. 164, *c*), on éprouve une résistance notable à le déplacer comme précédemment, et au lieu que le mouvement se produise dans la direction de la force appliquée, le gyroscope tourne (fig. 164, *d*, *e*, *f*) jusqu'à ce que le plan de rotation coïncide avec le plan de la force.

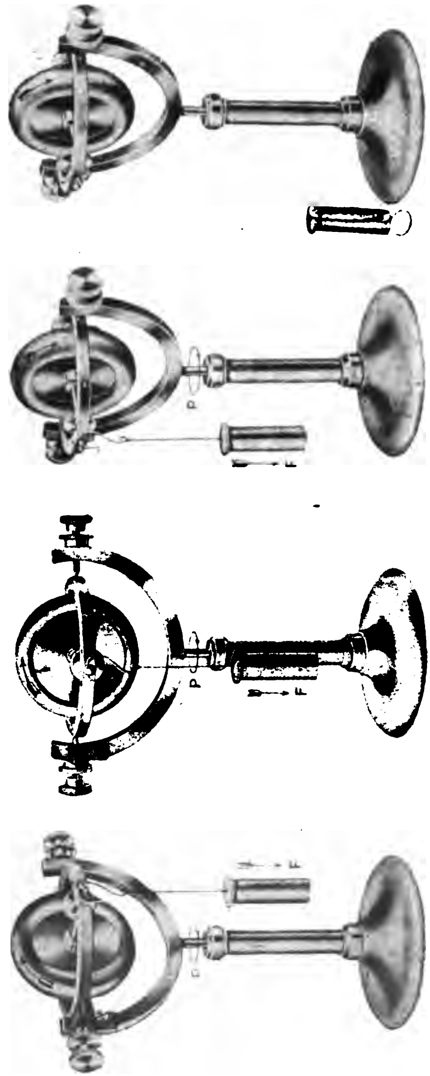


Fig. 165.

A ce moment on est revenu dans les conditions précédentes et la rotation autour de l'axe vertical se fait sans résistance. On vérifie ainsi que lorsqu'un gyroscope est soumis à une force ne coïncidant pas avec le plan de rotation, il oppose une résistance notable au mouvement et tourne autour d'un axe à angle droit avec la direction de la force, le mouvement ayant pour effet d'amener par le chemin le plus court le plan et la direction de rotation de l'appareil en coïncidence avec le plan et la direction de la force.

Quand la force perturbatrice à laquelle est soumis le gyroscope agit cons

tamment sur lui, par exemple si on suspend un poids comme il est représenté figure 165, le gyroscope ayant son axe horizontal la précession devient continue, et le gyroscope tourne dans le sens indiqué sur la figure, la précession cessant aussitôt que le poids est retiré. Naturellement, si on change le sens de rotation de l'appareil ou si on place le poids à l'autre extrémité de l'axe, la précession a lieu en sens inverse.

La seconde propriété du gyroscope est la fixité dans l'espace de son axe de rotation, ce que l'on peut appeler l'inertie gyroscopique et qui est une application de la première loi de Newton : « Un corps en mouvement suivant une ligne droite continue indéfiniment son mouvement, sauf si une force perturbatrice agit sur lui » ou encore : « un corps matériel ne modifie pas de lui-même son état de repos ou de mouvement ».

L'expérience est facile à réaliser (fig. 166) à l'aide d'un gyroscope analogue à celui qui nous a servi précédemment et qui est libre grâce à une suspension à la cardan. En déplaçant le pied dans des directions quelconques, on constate que le rotor du gyroscope reste invariable dans l'espace.



Fig. 166.

Mais une autre expérience montre d'une façon plus frappante encore cette propriété, en même temps qu'elle met en évidence la rotation de la Terre. Supposons qu'à l'équateur on dispose un gyroscope comme l'indique la figure 167, c'est-à-dire son axe horizontal dirigé dans la direction est-ouest :

on constate qu'au bout de trois heures l'axe est incliné de 45° (fig. 167_3) sur l'horizontale, qu'au bout de six heures il aura tourné de 90° (fig. 167_6) et que son mouvement continuera comme l'indiquent les figures suivantes, les indices 9, 12, 18, 24 étant relatifs aux temps écoulés depuis le commencement de l'expérience.

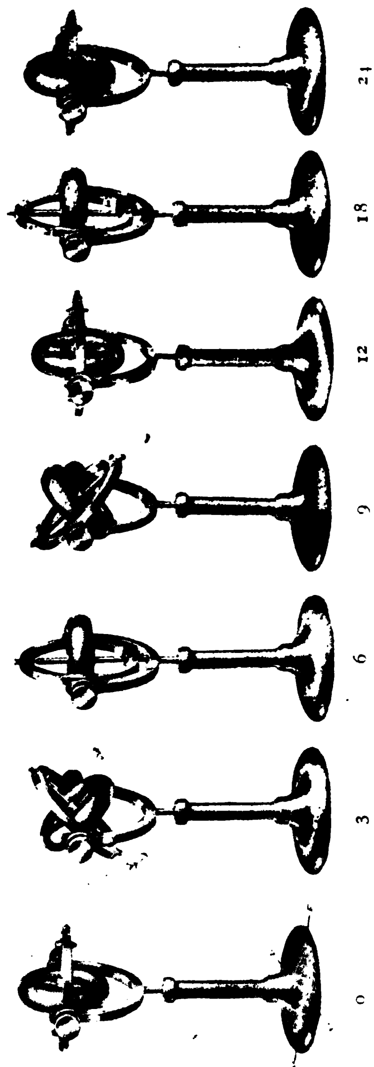


Fig. 167.

L'axe du gyroscope n'a cependant pas tourné ; mais c'est la Terre qui, elle, s'est déplacée, et la figure 168 permet de se rendre compte du phénomène, la rotation apparente de l'axe étant, comme on le voit, en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Aux pôles, comme il est facile de l'imaginer, la rotation aurait lieu autour d'un axe vertical, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre au pôle

nord, dans le sens des aiguilles d'une montre au pôle sud.

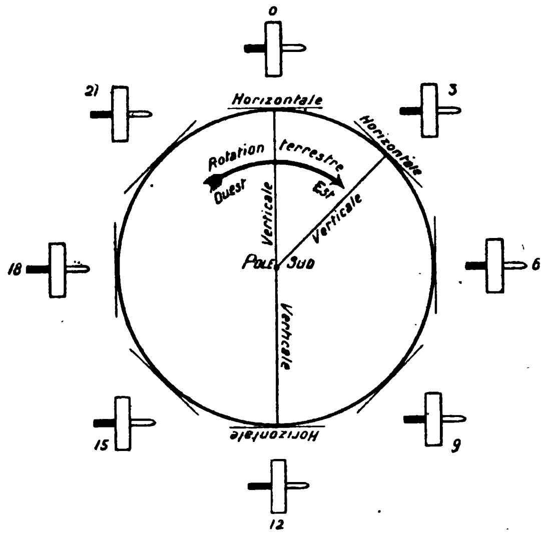


Fig. 168.

A une latitude intermédiaire entre le pôle et l'équateur, un rotor de gyroscope dont l'axe serait horizontal et dans le plan du méridien ne sera ni parallèle ni perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre, et formera avec lui un angle de 50°, par exemple, si on se trouve à la latitude 50 (fig. 169). L'inertie gyroscopique déterminera alors la rotation apparente en vingt-

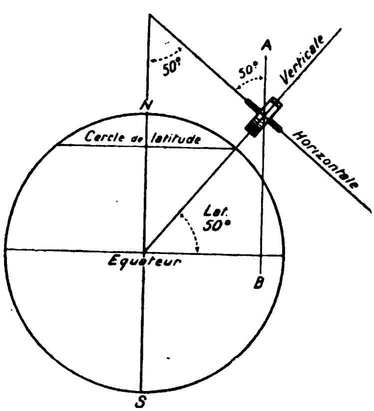


Fig. 169.

quatre heures autour d'une ligne AB parallèle à l'axe de la Terre.

Mais d'autres expériences curieuses peuvent être faites avec le gyroscope ; nous en indiquerons quelques-unes, d'après le *Traité de mécanique* de Bouasse, sans entrer dans leur interprétation mathématique.

Suspendons par un fil un gyroscope muni d'une tige métallique prolongeant son axe (fig. 170) et sous lequel est attaché un cornet rempli de sable. En donnant une légère impulsion à ce pendule, lorsque le gyroscope est lancé, on le voit se déplacer en décrivant une courbe analogue à celle de la figure.

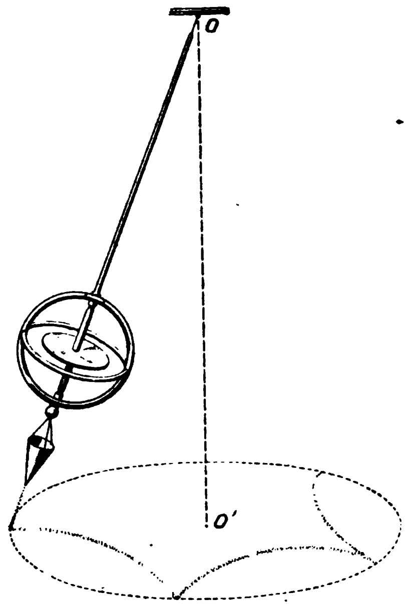


Fig. 170.

De plus, on remarquera — et cette propriété, comme nous le verrons, est utilisée dans les stabilisateurs de bateau — que la durée d'oscillation du pendule composé ainsi réalisé n'est pas la même, le gyroscope n'étant arrêté que lorsqu'il est en rotation. Dans ce cas elle est notablement plus grande. En suspendant, au contraire, le gyroscope par un fil de caoutchouc tordu fixé en un point du plan de rotation (fig. 171), nous obtiendrons un pendule conique ; le système se déplacera comme l'indique la figure, en même temps que le

caoutchouc se distendra, puis se tordra en sens inverse, et ce sera alternativement l'un ou l'autre bout de l'axe de rotation propre qui se relèvera.

Les effets gyroscopiques se produisent dans un grand nombre de cas et il nous suffira, avant de passer en revue les applications dans lesquelles on les utilise sciemment,

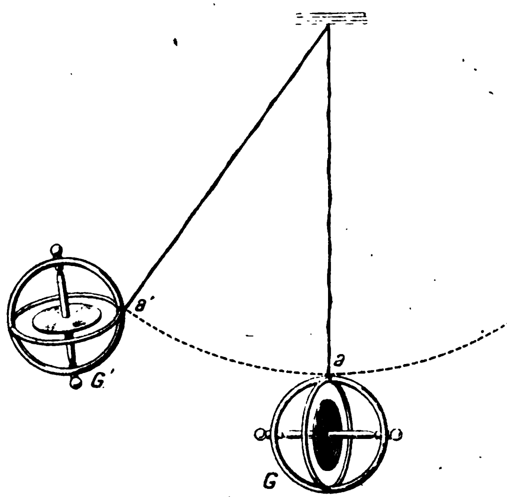


Fig. 171.

d'en citer quelques-unes : la Terre d'abord est un énorme gyroscope tournant autour d'un axe qui, par suite des actions des astres auxquelles il est soumis, présente un mouvement de précession tout comme le gyroscope d'expérience sur lequel nous agissions tout à l'heure. L'axe de la Terre se comporte de la même manière que celui du gyroscope de la figure 161 et décrit autour de la normale menée par son centre au plan de l'écliptique (plan dans lequel elle accomplit son parcours annuel autour du Soleil), un petit cône, la durée de

rotation étant de 26 000 ans environ : c'est le phénomène de la précession des équinoxes.

Plus près de nous, les roues d'un train qui décrit une courbe jouent le rôle d'un gyroscope à axe horizontal auquel on impose une précession autour d'un axe vertical. Il en résulte un accroissement de pression sur le rail extérieur et une diminution de pression sur le rail intérieur, s'ajoutant à la force centrifuge pour tendre à faire culbuter le train.

Une turbine de Laval dans laquelle le rotor qui porte les autres tourne à une très grande vitesse (jusqu'à 20 000 tours par minute) constitue un gyroscope et on ne peut assurer le fonctionnement de ces appareils qu'en les munissant d'un axe flexible, non seulement à cause uniquement de la force centrifuge, comme on le croit généralement, mais surtout à cause du mouvement de précession que le disque tend à prendre.

Dans les avions, et surtout dans ceux où le moteur est rotatif, l'ensemble hélice-moteur constitue un gyroscope ; de même, dans les bateaux à turbine, la machine et les arbres de couche. Il en résulte certaines propriétés de l'ensemble dont les constructeurs doivent tenir compte pour l'établissement des surfaces des gouvernails de direction. A côté de ces réalisations « involontaires » de gyroscopes, il est un grand nombre de cas dans lesquels on a délibérément employé les remarquables propriétés de ces appareils dans des buts spéciaux, et ce sont ces utilisations qu'il nous reste à passer rapidement en revue.

Le monorail Brennan. — Parmi l'une des applications d'avant-guerre, il faut citer le monorail Brennan. C'était, ainsi que l'on peut s'en rendre compte d'après la figure 172, un véhicule qui, bien que son centre de gravité fût à une assez grande distance du rail unique sur lequel il roulait,

conservait sa stabilité, grâce à un système gyroscopique.

Ce système était formé de deux volants tournant en sens opposé sous l'action de moteurs électriques, enfermés dans des boîtes dans lesquelles l'atmosphère était raréfiée de façon à réduire les frottements au minimum. Une fois lancés, si

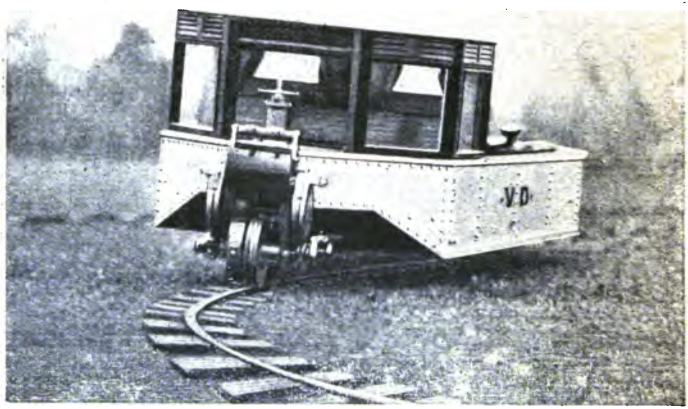


Fig. 172. — Aspect frontal du car conducteur Brennan.

on coupait le courant, leur rotation continuait pendant plusieurs heures. Le poids de l'ensemble de l'installation d'équilibrage ne dépassait pas le vingtième du poids total de la voiture.

D'après l'inventeur, ce système de voiture présente de nombreux avantages : stabilité par suite de la suppression des oscillations latérales, possibilité de franchir des courbes très accentuées à toute vitesse, confort, économie de construction de la voie et économie de combustible.

L'inventeur fut d'ailleurs subventionné par le Ministère de la Guerre anglais, en 1907, son monorail semblant offrir, pour le temps de guerre, des caractéristiques des plus précieuses, la voie pouvant être installée à raison de 30 kilomètres par jour sur des terrains très accidentés. Mais la pratique a-t-elle vérifié ces conclusions? En tout cas, il ne semble pas que dans la guerre actuelle ce genre de chemin de fer ait été utilisé.

Il n'en est pas de même des appareils suivants que nous allons étudier avec plus de détails : nous voulons parler des stabilisateurs des torpilles, des dispositifs anti-roulis et surtout des compas gyroscopiques et des stabilisateurs d'avion dont la perfection et l'efficacité ne sont plus à démontrer. Nous devons nos renseignements à l'amabilité de la Sperry Gyroscope C° qui s'est spécialisée dans les applications du gyroscope et dont les appareils sont uniquement employés par les Alliés.

Stabilisateur des torpilles. — Le problème de la direction des torpilles s'est dès le début heurté à de grandes difficultés. La vitesse de l'engin n'étant pas suffisante pour lui assurer une trajectoire rigide et les actions perturbatrices dues aux mouvements de la mer étant très énergiques, la torpille, sous leur influence, déviait presque aussitôt sortie de l'appareil de lancement et sa direction était absolument quelconque ; la difficulté était du même ordre que celle que l'on rencontre dans le lancement des fusées automotrices qui, dans leur déplacement dans l'air, sont le jouet des remous de l'atmosphère.

Mais si, dans ce dernier cas, l'importance de l'engin ne permet pas d'envisager l'adaptation d'un mécanisme de stabilisation de la trajectoire, il n'en est pas de même pour les torpilles dont le prix élevé (de l'ordre de 30 000 francs), la puissance d'action et le faible approvisionnement à bord

des navires de guerre imposent, pour qu'elles aient une valeur militaire quelconque, une utilisation sûre. Il a donc fallu leur adjoindre un dispositif conservant immuable dans l'espace la direction qui lui est donnée au départ et agissant sur



Fig. 173. — Le gyroscope stabilisateur de la torpille.

les torpilles de façon à corriger leurs écarts accidentels.

Le gyroscope était tout indiqué, puisque, ainsi que nous l'avons vu, il possède la précieuse propriété de réagir énergiquement contre toute action perturbatrice tendant à modifier la direction de son axe de rotation.

Remarquons d'ailleurs que dans les stabilisateurs de torpille, l'axe du tore étant par exemple horizontal au moment du départ restera mathématiquement pointé sur une étoile fictive à l'horizon et par suite présentera une

précession par rapport à la direction de lancement ; mais comme le trajet est très rapide et que la précession n'a pas le temps d'acquérir une valeur notable, on peut admettre en pratique que l'axe de l'appareil conserve une direction invariable par rapport à l'horizon.

L'appareil dont la figure 173 donne une vue d'ensemble est soit lancé à l'aide d'un ressort, soit actionné par l'air comprimé emprunté au réservoir du moteur de propulsion. Quand la torpille varie de direction, l'axe du gyroscope se déplace par rapport à elle et actionne le tiroir d'un cylindre à air comprimé dont le piston commande un gouvernail vertical de direction qui ramène la torpille à sa direction correcte.

Appareil Fleuriais. — Une application assez peu connue du gyroscope est son emploi pour la réalisation d'un plan de référence pour les observations du « point » en mer.

A la mer, le seul repère qui offre un caractère de fixité sur lequel on puisse se baser pour déterminer la position où l'on se trouve est la ligne de démarcation entre le ciel et l'eau ; mais il arrive souvent que cette ligne est mal définie, par exemple si un banc de brume la cache, tandis que le soleil reste visible ; dans ce cas, il est impossible de déterminer la position du bateau avec le sextant. La nuit, il ne faut pour ainsi dire jamais compter pouvoir se servir de l'horizon de la mer. La production d'un horizon artificiel, qui était déjà d'une grande nécessité pour les navires à voiles, est devenue d'un intérêt de tout premier ordre avec la navigation à vapeur et la vitesse actuelle des navires qui rend indispensable l'obtention de points de jour et surtout de nuit.

Mais créer à bord d'un bateau sans cesse en mouvement sur la mer un horizon artificiel bien défini par rapport à la verticale vraie n'est pas un problème simple.

Pendant longtemps on a eu recours à des niveaux, à des flotteurs, à des appareils suspendus, mais la meilleure solution a

été fournie par le gyroscope collimateur de l'amiral Fleuriais.

En effet, on conçoit très facilement que, puisque le gyroscope se place de façon que son axe soit dans le plan du méridien du lieu et parallèle à l'axe de rotation de la Terre, il permet de réaliser un « zénith instrumental » par rapport auquel on pourra repérer les astres.

L'appareil dont la figure 174 montre une coupe est constitué par un tore en rotation dans une boîte hermétique où l'on fait le vide de façon à diminuer les frottements et permettre une marge plus longue pour faire les observations, après avoir lancé le tore par l'air comprimé.

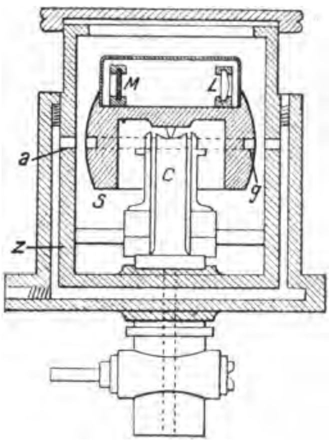


Fig. 174. — Coupe schématique de l'appareil Fleuriais.

Le tore ou gyroscope se compose d'un corps de révolution pouvant tourner et osciller avec la plus grande facilité autour d'un pivot situé au-dessus et voisin du centre de gravité ; la rotation se fait sur une pointe qui repose dans une crapaudine C.

Le corps de révolution ou gyroscope a la forme d'un segment sphérique S ayant pour centre l'extrémité du pivot de suspension ; il est évidé de manière à concentrer toute la masse utile vers la circonférence et à une faible hauteur au-dessus et au-dessous du plan diamétral principal pour augmenter le moment d'inertie et diminuer le poids.

Une gorge annulaire g, pratiquée dans l'équateur du segment, forme une suite d'augets dans lesquels l'air, en venant frapper, donne le mouvement. A la partie supérieure

du gyroscope se trouve un collimateur spécial se composant d'un objectif dont le foyer est exactement au milieu d'un faisceau de traits clairs et transparents tracés sur une plaque de verre M dont le fond est noir : l'objectif et la plaque de verre portant les traits sont fixés au gyroscope de façon qu'ils ne puissent pas se déplacer ; les traits tracés sont perpendiculaires à l'axe de rotation du système. Lorsque le gyroscope tourne, par suite de la persistance des images rétiniennes, les images des traits qui viennent se former périodiquement dans l'œil donnent l'illusion d'être continues et forment alors une image ML par rapport à laquelle on repère l'image d'un astre au moyen du sextant.

Le réseau tracé sur la glace est représenté (fig. 175) tel qu'il apparaît à l'observateur dans la lunette du sextant ; il a l'avantage de permettre les lectures sans déplacer l'alidade. Le milieu du faisceau indique l'horizon à une constante près. Chaque intervalle des traits vaut dix minutes comptées en plus ou en moins suivant que l'astre, soleil ou étoile, apparaît en dessus ou en dessous du milieu.

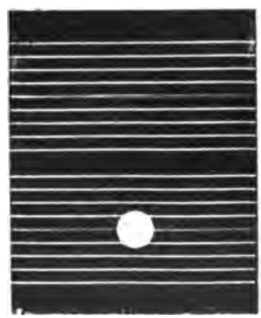


Fig. 175. — Ce que l'on voit dans l'appareil Fleuriais.

Exemple : dans la figure 175, la lunette d'observation étant astronomique et retournant les images, le bord inférieur du soleil se trouve à — 65 minutes qu'il conviendra de retrancher de la lecture faite sur l'alidade de l'octant.

La boussole gyroscopique. — Sur les navires modernes, par suite de l'emploi du fer, le champ magnétique terrestre est considérablement altéré. Les boussoles ordinaires, les « compas » de route, nécessitant des corrections multiples, la di-

rection qu'ils indiquent est absolument différente de la direction nord-sud du méridien magnétique, à cause de l'attraction des masses de fer qui les environnent, coque, machines, chaudières, etc.

Sur les navires de guerre, véritables blocs métalliques, sous les cuirasses des postes de commandement, les données du compas magnétique sont incertaines et même variables suivant la position à bord des énormes masses des tourelles et des canons, le régime du circuit électrique et l'aimantation accidentelle de la coque.

Pour les sous-marins, où tout compas est forcément à l'intérieur de la coque, les indications sont absolument illusoires.

C'est pourquoi les compas gyroscopiques dont l'orientation, due à des actions mécaniques, est indépendante des champs accidentels et variables dans lesquels ils se trouvent placés, tendent de plus en plus à être uniquement utilisés, non seulement sur les navires de guerre et les sous-marins, mais encore sur tous les grands transatlantiques.

Le principe de ces instruments est simple : il repose sur la propriété fondamentale du gyroscope que nous avons signalée précédemment de tendre à se placer de façon que son axe soit rigoureusement parallèle à l'axe de rotation de la terre, mais la réalisation est beaucoup plus compliquée.

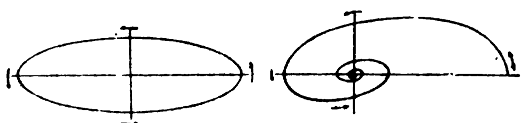
En effet, pour la commodité de la construction et de l'observation, il y a intérêt d'une part à ce que l'axe du gyroscope soit horizontal ; d'autre part, à ce que les oscillations que le tore en rotation va prendre autour de sa position d'équilibre soient amorties ; enfin à ce que les perturbations dues au navire soient éliminées. Il faut donc d'abord, par l'addition d'un poids, forcer le gyroscope à avoir son axe horizontal, comme nous l'avons fait dans une des expériences

indiquées au début de l'article, et amortir les oscillations en créant un couple antagoniste de celui qui donne à l'appareil son mouvement de précession.

C'est encore le contrepoids qui agit.

Pour comprendre son mode d'action, il faut se représenter le mouvement qu'il doit supprimer.

Ce mouvement est double : d'une part, il y a précession de l'est à l'ouest et, d'autre part, pendant ce mouvement, l'angle formé par l'axe avec l'horizon varie, de sorte que l'extrémité de l'axe décrit une ellipse dans l'espace (fig. 176, *a*).



a *b*

Fig. 176.

Les deux composantes de mouvement sont d'ailleurs en *quadratures*, c'est-à-dire que lorsque l'une est maxima, l'autre est nulle.

C'est grâce à cela que le contrepoids peut amortir les oscillations, car, par suite de l'inclinaison variable de l'axe du gyroscope avec l'horizon, la valeur de l'effort qu'il exerce est, elle aussi, variable et change la valeur du couple d'amortissement : il la renforce ou la diminue suivant que l'axe va vers le méridien ou s'en éloigne, de sorte que l'ellipse décrite par l'extrémité de l'axe se transforme en une spirale qui bientôt se réduit à un point (fig. 176, *b*).

Lorsque le bateau marche, les girations et la vitesse interviennent pour modifier la direction d'équilibre du gyroscope ; aussi l'appareil est-il muni d'un correcteur automatique qui agit sur la ligne de foi et qui est commandé par un cadran des vitesses et un cadran des latitudes.

Les figures 177 à 180 montrent l'appareil lui-même et les

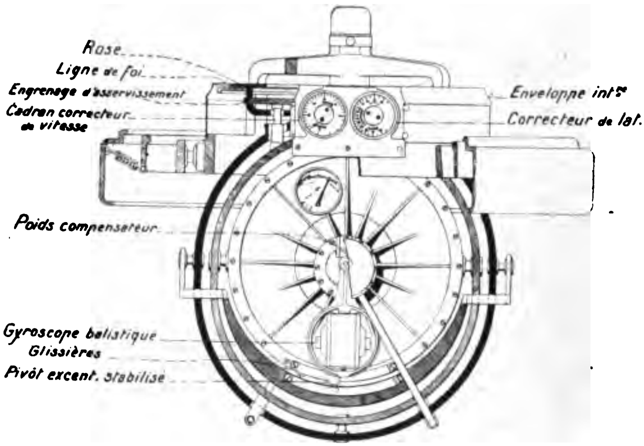


Fig. 177. — Coupe du compas gyroscopique. Vue dans la direction nord-su

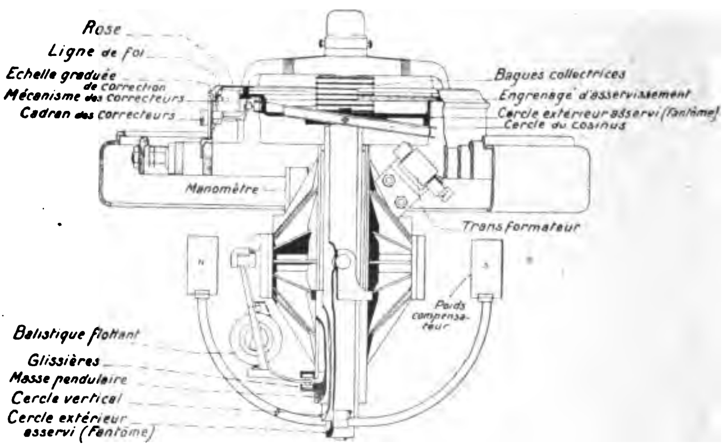


Fig. 178. — Coupe du compas gyroscopique. Vue dans la direction est-ouest.

organes dont nous venons de donner succinctement la raison d'être.

Le gyroscope proprement dit constitue le rotor d'un petit moteur éléctrique triphasé à champ tournant fonctionnant sous 90 volts obtenus grâce à un petit transformateur.

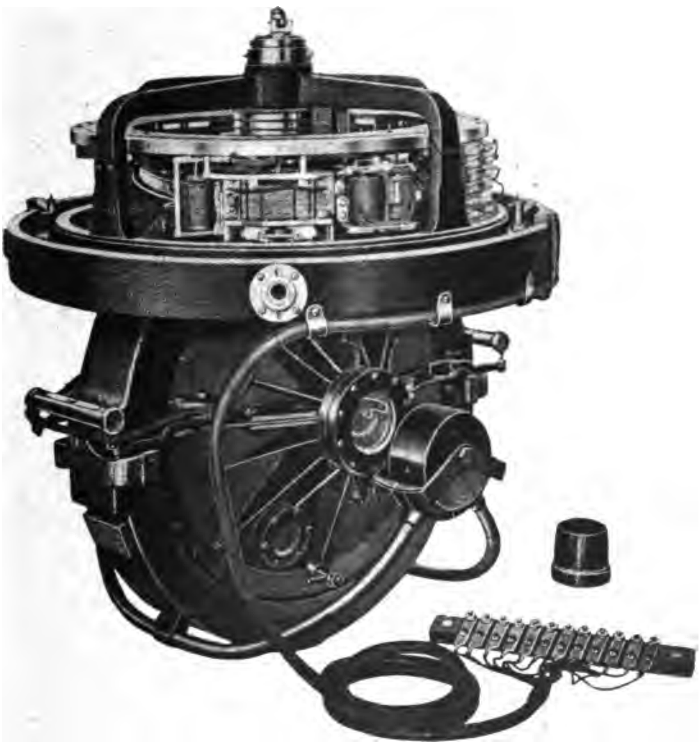


Fig. 179. — Vue dans la direction sud-ouest de l'élément gyroscopique du compas.

L'appareil accomplit 8 600 tours à la minute. Il fonctionne dans une boîte étanche en aluminium dans laquelle on fait le vide, de façon à diminuer les frottements. La rose n'est pas entraînée directement par le gyroscope, mais elle est actionnée par un petit moteur auxiliaire, de façon

que le tore ait la plus grande liberté possible pour s'orienter sous l'influence de la terre et que l'on puisse lui faire sans inconvénient commander des « répétiteurs » ou « compas secondaires » disposés dans les diverses parties du navire.

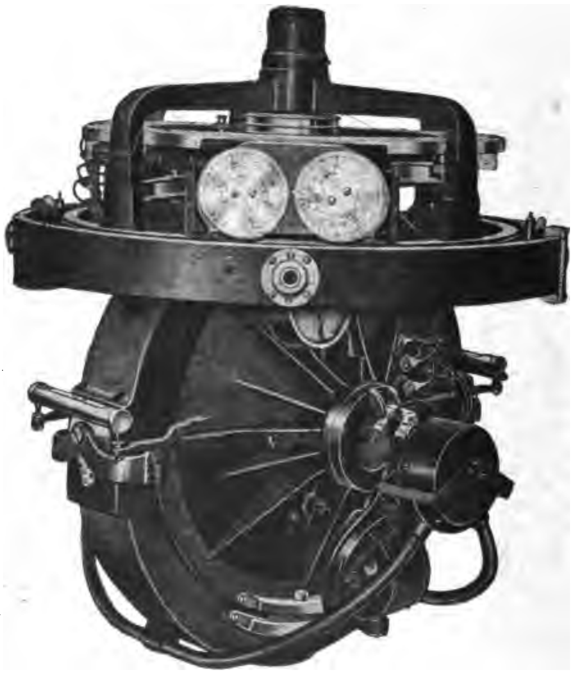


Fig. 180. — Le compas gyroscopique sorti de son support et vu dans la direction nord-est.

Les communications électriques entre ces deux moteurs ont lieu à l'aide de deux petites prises à trolley.

Quelque compliquée que puisse paraître cette installation, même en faisant abstraction de tous les dispositifs accessoires d'alarme en cas de mauvais fonctionnement, d'un petit gyroscope dont nous n'avons pas parlé, etc., elle

n'en est pas moins d'un fonctionnement éprouvé et très sûr.

Les navires de guerre, les sous-marins, les grands transatlantiques ont adopté le compas gyroscopique et cela est, pour qui connaît la marine, une véritable révolution.

Nous venons de voir quelques applications du gyroscope, mais il en est une autre classe excessivement intéressante : nous voulons parler de son emploi comme stabilisateur.

LA STABILISATION DES NAVIRES ET DES AVIONS

Pour l'aviation du temps de paix, qui, sans doute, se développera d'une façon prodigieuse, par suite des progrès accomplis pendant la guerre dans la construction et la conduite des appareils, la stabilisation automatique ou, mieux encore, la conduite automatique, constitue certainement l'objectif le plus important à atteindre. Déjà, avant la guerre, de nombreux dispositifs ont été proposés, stabilisateurs Doutre, Moreau, etc., mais tous ces appareils, quelles que soient leur ingéniosité, leur efficacité même, ne fournissaient qu'une solution imparfaite ; ils ne fonctionnaient, pourrait-on dire, qu'en cas de faute grave du pilote ou de danger réel de l'appareil ; leur sensibilité et leur principe faisaient qu'ils n'intervenaient que lorsque l'action perturbatrice s'était déjà traduite par une modification appréciable du régime de vol de l'avion.

Dans un autre domaine, en marine, le même reproche pouvait être fait aux stabilisateurs antiroulis, qu'ils aient pour principe, comme dans le système Frahm, le déplacement de l'eau dans des réservoirs, ou, comme dans le système Schlick, l'action d'un gyroscope changeant la période

d'oscillation du navire. Il fallait que le bateau roule fortement pour que le dispositif fonctionne.

Au contraire, nous allons étudier les dispositifs gyroscopiques de la Sperry Gyroscope C° qui est arrivée à des réalisations en tous points remarquables et dans lesquels, au contraire, on cherche à empêcher le mouvement perturbateur de se produire, sitôt qu'il tend à s'amorcer. Naturellement, pour obtenir ce résultat, il faut qu'un appareil extrêmement sensible commande la mise en marche immédiate d'un système plus puissant dont la taille est en rapport avec la grandeur de la force à contre-balancer. L'étude approfondie du compas gyroscopique a permis de réaliser cet appareil et c'est un des plus beaux résultats mécaniques que la commande instantanée d'un énorme gyroscope stabilisateur de 30 tonnes, par exemple, par un gyroscope du poids de quelques kilogrammes.

Le pilote automatique gyroscopique. — La nécessité de réaliser la stabilité automatique des aéroplanes et de leur donner le moyen de se repérer par rapport au sol est devenue de plus en plus impérieuse depuis que les perfectionnements de l'aviation ont permis, ce à quoi l'on n'eût même pas osé penser il y a seulement dix ans, des vols de nuit et des vols par temps brumeux. Nos pilotes militaires peuvent sortir par tous les temps, et si, les jours de brume, ils ne prennent que rarement l'air, c'est que leur travail est impossible et non que leur habileté soit en défaut. Cependant la conduite d'un avion la nuit, ou par temps brumeux lorsque la terre est invisible, est beaucoup plus compliquée que lorsque la visibilité permet au pilote de se repérer par rapport au sol. Non seulement la direction de vol est absolument indéterminée, puisque la dérive est inconnue et, par suite, les indications de la boussole inutilisables, mais

encore la position de l'avion dans l'atmosphère est ignorée du pilote.

Sous l'influence de la force centrifuge et de l'accélération



Fig. 181. — Le servo-moteur.

du mouvement de l'appareil, la position de la verticale apparente n'a aucun rapport avec la verticale vraie et on peut presque dire que, dans un banc de brume, un avion peut voler sens dessus dessous, ou complètement couché sur une aile sans s'en apercevoir... si ce n'est par les accidents qui

résultent de ces positions anormales (glissades sur l'aile, chute verticale, etc.). Dans les vols de nuit, les deux petites lampes bleue et rouge qui brillent aux ailes des avions servent non seulement à repérer leur sens de marche pour les observateurs à terre, mais surtout à renseigner le pilote sur la position de son avion.

Même en vol normal, la réalisation à bord de la verticale du lieu est impossible par suite des petites variations insensibles dans la marche de l'avion. Il n'est peut-être pas de difficulté plus grande pour un pilote que de voler dans un plan rigoureusement horizontal, et cependant, comme nous allons le voir, cela est une nécessité pour l'avion de guerre de bombardement.

Aller à plusieurs centaines de kilomètres parfois en terre ennemie, voler pendant cinq ou six heures, exposé aux rencontres d'avions de chasse, au tir des batteries anti-aériennes, exiger de l'appareil et du pilote un effort voisin du maximum, pour lancer 5 ou 6 bombes sur un objectif déterminé, de dimensions parfois restreintes, impose, pour que l'expédition ne soit pas stérile, que les bombes soient sûrement placées aux buts. Or, comme nous l'avons vu, la visée comporte deux opérations distinctes : 1° la détermination de la vitesse de l'avion volant *horizontalement* par rapport au sol afin de connaître la vitesse du vent dans lequel on se déplace ; 2° le lancer des bombes au moment précis indiqué par l'appareil de visée qui a été établi en supposant l'avion *horizontal*.

On voit donc qu'il y a le plus grand intérêt à ce que la position de l'avion soit stabilisée par rapport au sol, pour lancer les bombes et pour soulager le pilote fatigué par une longue randonnée.

C'est ce qui est obtenu par le *pilote automatique Sperry*, appareil mécanique qui fournit la solution de la sécurité et de

la facilité du vol d'une part en réalisant un plan de référence constant dans l'espace, par rapport auquel sont repérés les mouvements de tangage et de roulis de l'avion, et, d'autre part, en maintenant automatiquement la stabilité du vol, quelle que soit sa direction.

Le pilote *automatique*, en particulier, commande les ailerons de telle sorte que l'aéroplane peut être maintenu indéfiniment dans une position donnée du vol, déchargeant ainsi le pilote d'une grosse partie de son travail.

La marche de l'avion à travers les nuages et les bancs de brume est aussi sûre que celle d'un train dans un tunnel. L'effort exigé du pilote est infime, comparable à celui que l'on effectue lorsque l'on actionne une machine à écrire, et cela quelle que soit la taille de l'avion.

Le principe de l'appareil repose sur les propriétés du gyroscope, propriétés qui sont l'*inertie gyroscopique* (fixité de l'axe de rotation par rapport à l'espace) et la *précession*, mouvement paradoxal à première vue, que prend le gyroscope sous l'influence d'une force appliquée à son axe.

Le mouvement, en effet, a lieu dans une direction perpendiculaire à celle de la force et une force antagoniste est développée, opposée à la force perturbatrice.

Par exemple, considérons trois axes rectangulaires dans l'espace, formant les trois arêtes d'un trièdre trirectangle, XX', YY', ZZ'. Supposons que l'axe du gyroscope est dirigé suivant XY' et que la force perturbatrice tend à le faire tourner autour de l'axe YX' ; la précession se produit autour de l'axe ZZ', dans un sens tel que le plan et la direction de rotation du gyroscope soient amenés à coïncider avec le plan et la direction de force. La vitesse de précession est fonction de la vitesse de rotation et de la force perturbatrice.

Dans la pratique, les propriétés sont modifiées :

1° En suspendant le gyroscope à la cardan, de façon

qu'il puisse s'orienter librement par rapport à l'axe de la terre ;

2° En couplant deux gyroscopes tournant en sens inverse de façon à éliminer les effets des forces perturbatrices dans certaines directions ;

3° En déséquilibrant intentionnellement le système de façon que la précession puisse se produire dans certaines directions et avec une vitesse déterminée.

Le *pilote automatique Sperry* est composé de quatre organes principaux que nous allons passer successivement en revue :

1° Le gyroscope ; 2° le servo-moteur ; 3° le générateur électrique ; 4° le levier de contrôle actionnant les contacts électriques du système.

L'élément gyroscopique, partie essentielle du système, est formé par deux paires de rotors tournant en sens inverse, les deux gyroscopes d'une même paire étant rendus solidaires par un engrenage ; toutes ces masses tournent autour d'axes de rotation horizontaux et constituent les rotors de petits moteurs électriques. La vitesse de rotation est d'environ 12 000 tours à la minute et le courant fourni sous 20 volts. L'ensemble est monté sur une suspension à la cardan.

Une des paires de gyroscopes est stabilisée par rapport à l'axe longitudinal de l'avion et l'autre paire par rapport à l'axe transversal. Dans ces conditions, lorsque l'appareil fonctionne, l'ensemble des quatre petits moteurs constitue un plan horizontal indépendant des mouvements propres de l'avion. Ceux-ci déterminent, comme nous l'allons voir, la commande électrique du servo-moteur qui actionne les organes de direction et de stabilité de l'aéroplane.

A cet effet, chaque paire de gyroscopes manœuvre un commutateur à deux segments, l'un pour la stabilisation

latérale, l'autre pour la stabilisation transversale. Ces segments sont solidaires des mouvements apparents du système gyroscopique et se déplacent devant des balais fixes par rapport à l'avion.

En position normale du vol, les balais frottent sur les parties isolées des commutateurs, mais la plus petite déviation de la position normale détermine le déplacement des balais, dans un sens ou dans l'autre, et le courant électrique se ferme alors par un circuit ou par un autre actionnant immédiatement le servo-moteur, qui réagit sur les commandes.

La sensibilité de l'appareil est telle que des écarts de moins de 1 degré par rapport à la position normale, écarts qui sont imperceptibles au pilote, déterminent le fonctionnement du servo-moteur.

L'élément gyroscopique est complété par différents organes qui ont pour but de le soustraire aux efforts d'accélération et à la force centrifuge dus au mouvement même de l'avion et qui donneraient lieu à des réactions sur les gyroscopes, tendant à détruire le parallélisme de leurs axes. Il faut donc leur appliquer une force compensatrice.

Elle est fournie par un « impressor system » formé d'un moteur monté sur la plate-forme de l'appareil et commandant l'un ou l'autre de deux manchons d'accouplement tournant en sens inverse, le choix étant fait par l'intermédiaire de deux balais fixes par rapport au système gyroscopique et envoyant le courant dans un commutateur à deux directions monté sur l'axe de précession.

Toute force perturbatrice non contenue dans le plan de rotation des gyroscopes détermine un mouvement de précession qui amène l'un ou l'autre des segments de ce commutateur sous les balais, envoyant le courant dans un électroaimant qui bloque le manchon d'accouplement correspon-

dant. On exerce ainsi une force compensatrice sur les gyroscopes et le mouvement de précession s'arrête.

Le *servo-moteur* est commandé par le système gyroscopique dont nous venons de parler et qui, grâce à sa compensation, réalise un plan rigoureusement constant dans l'espace. C'est un appareil électro-mécanique qui transmet aux organes de commande les indications du gyroscope. Comme les ailerons et les stabilisateurs ont chacun deux fils de commande, et sont couplés deux à deux, quatre fils formant deux paires arrivent au servo-moteur. Chaque paire s'enroule sur un tambour, immobile en position normale, mais qui peut tourner lorsque l'accouplement est réalisé sous l'action d'une hélice montée sur l'appareil et actionnée par le vent de la marche.

Cet accouplement a lieu électriquement de la façon suivante : l'hélice entraîne une roue dentée qui engrène sur deux paires de disques tournant en sens inverse, manchonnés sur les tambours et portant des électro-aimants. Lorsque le courant, envoyé par le gyroscope, passe dans les électro-aimants, ceux-ci attirent fortement le manchon et réalisent l'accouplement magnétique. Suivant l'indication du système stabilisateur, c'est l'un ou l'autre des disques actionnant le tambour qui tourne alors dans un sens ou dans l'autre.

L'hélice du servo-moteur a des pales articulées, qui, par l'action de la force centrifuge, prennent des inclinaisons variables par rapport à la direction de rotation, de façon à conserver une vitesse de rotation constante.

Le *générateur* actionné par une hélice est une petite dynamo spécialement établie pour donner, d'une part, le courant triphasé qui actionne les gyroscopes et, d'autre part, le courant continu à 20 volts pour le fonctionnement du servo-moteur et des dispositifs accessoires du gyroscope.

On comprend facilement quelle sécurité cette installation procure au pilote, dont elle diminue à la fois la tension nerveuse et l'effort physique. Les derniers essais ont montré que l'on pouvait, pendant plus de deux heures, abandonner au *pilote automatique* la conduite de l'avion sans aucun inconvénient, le rôle de l'aviateur se réduisant à assurer la direction de route.

Stabilisateur gyroscopique des navires. — Nous avons dit que lorsqu'un gyroscope en rotation est rendu solidaire d'un pendule, la durée d'oscillation de ce dernier est augmentée. C'est sur ce principe que fonctionnent les gyroscopes stabilisateurs des bateaux. Grâce à ces appareils, on pourra donc augmenter considérablement la période de roulis qui varie, suivant les bateaux, de 3 ou 4 secondes à 13 ou 14. Or, les grands roulis sont dus à l'action de houles synchrones à la période du navire ; leurs impulsions, comme dans le cas bien connu de la balançoire, s'ajoutent constamment. Comme il ne pourra, dans le cas d'un navire stabilisé, y avoir de houles de périodes assez grandes pour lui être synchrones, le roulis ne pourra prendre une grande amplitude et, de plus, la tendance à embarder sera supprimée. Enfin, par suite de la réaction du gyroscope, l'amortissement des oscillations sera très rapide. De cette façon, la stabilité de plate-forme si utile sur les navires de guerre pour la précision du tir des canons sera plus facilement réalisée.

Dans le gyroscope-stabilisateur Sperry, c'est la précession qui est le phénomène sur lequel on s'appuie pour déterminer le moment de rotation en sens inverse servant à neutraliser la poussée des flots. Elle est commandée par un moteur lui-même sous la dépendance d'un petit gyroscope très sensible. Quand le bateau commence à rouler, ce petit gyroscope établit un contact qui met en mouvement le moteur de pré-

cession du stabilisateur et fait tourner le gyroscope dans le sens et à la vitesse nécessaires pour neutraliser la poussée

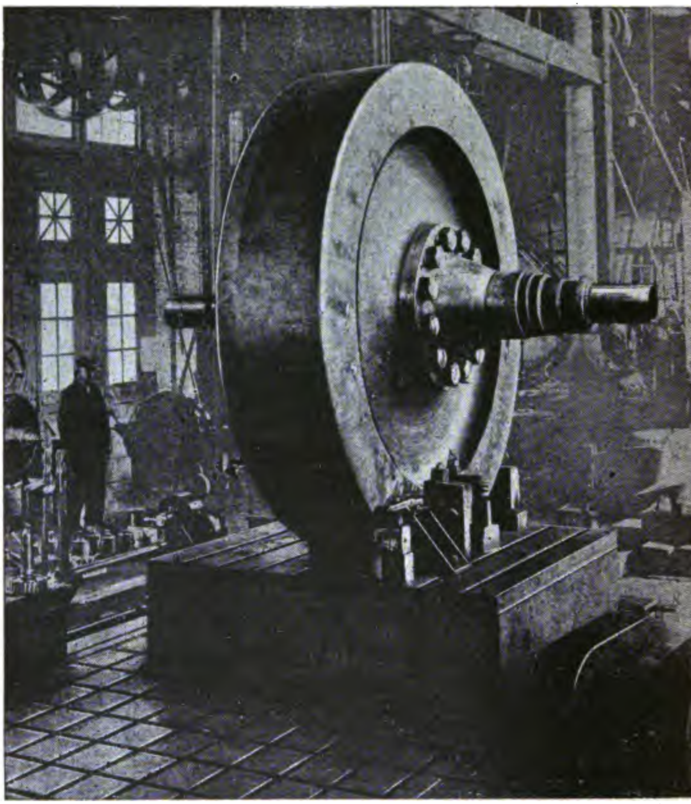


Fig. 182. — Le rotor du gyroscope stabilisateur d'un cuirassé (poids : 30 tonnes).

de la mer. Dès que le moment de rotation en sens inverse égale cette poussée, le vaisseau cesse de rouler, le petit gyroscope rompt le contact et arrête le stabilisateur. On comprend donc, puisque l'appareil neutralise les poussées dues

aux ondes individuelles, qu'une installation relativement petite suffise pour stabiliser un navire et que les efforts exercés sur la coque soient très faibles.

Ce système est très supérieur au système Schlick dans lequel le gyroscope-stabilisateur ne commence son mouvement de précession que lorsque son axe de rotation a subi



Fig. 183. — Le carter du stabilisateur d'un cuirassé.

un déplacement considérable, puisque c'est un appareil auxiliaire très sensible qui commande instantanément les manœuvres.

Le poids total de l'appareil est d'environ 0,9 p. 100 du déplacement du navire. Des destroyers, des sous-marins, des transports sont munis de ces stabilisateurs dont les poids varient de 1 à 30 tonnes, et le gouvernement des États-Unis a décidé d'en munir les cinq cuirassés de la classe *Pensylvania* de 32 500 tonnes.

Les figures 182 et 183 montrent la roue gyroscopique proprement dite et le carter, dans lequel elle sera enfermée, d'un stabilisateur de cuirassé en cours d'usinage.

Telles sont les plus récentes applications du gyroscope. On voit, par leur diversité même, la souplesse, la précision et, en même temps, la robustesse et la puissance de son fonctionnement.

VI

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

LES PERFECTIONNEMENTS RÉCENTS DE LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

Depuis la guerre, la télégraphie sans fil a fait autant de progrès que l'aviation, mais, si tout le monde connaît plus ou moins les perfectionnements de la cinquième arme, il n'en est pas de même pour la télégraphie sans fil.

Lorsque les premières études sur l'émission d'électricité par les métaux chauffés furent entreprises par Richardson, ces recherches théoriques ont passé bien inaperçues et l'effet Edison ne semblait avoir d'autre intérêt que d'expliquer l'usure des lampes à incandescence. Nous allons voir quelle importance pratique ces phénomènes ont prise en radiographie et en télégraphie grâce aux travaux de Coolidge, Richardson, Fleming, Fessenden, Langmuir et, en France, de Ferrie et des officiers du service radiotélégraphique. Mais pour comprendre l'intérêt de ces nouvelles méthodes, qui ont complètement renouvelé la réception, il faut rapidement retracer l'histoire des détecteurs.

Les différents détecteurs. — Le premier en date est le cohéreur de Branly (fig. 184). Il consiste en un tube de verre renfermant de la limaille de fer placée entre deux électrodes métalliques. On a utilisé presque tous les métaux comme électrodes et comme limaille, mais il semble que

l'acier ou le fer donnent les meilleurs résultats pour la confection des électrodes, la limaille de fer ou de nickel assure un fonctionnement très régulier, les limailles d'or et d'argent une plus grande sensibilité de détection.

La grosse difficulté est d'assurer une bonne cohération par le frappeur automatique ; aussi ces appareils ne donnent

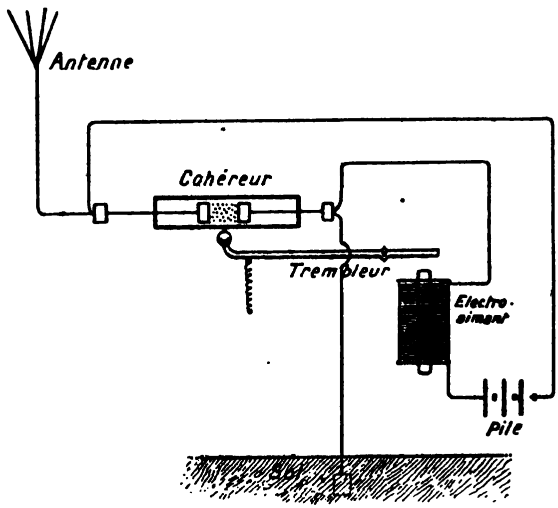


Fig. 184. — Montage du détecteur de Branly.

de résultats satisfaisants que pour de faibles distances et une transmission lente des signaux.

Les détecteurs thermiques, tels que les bolomètres et les thermogalvanomètres de Duddell, reposent sur un principe différent. Dans ce dernier appareil, un élément thermo-électrique disposé sous forme de cadre galvanométrique placé dans le champ d'un électro-aimant en fer à cheval est suspendu par un fil de quartz extrêmement fin. Lorsque l'antenne recueille les ondes hertziennes, un courant se produit qui chauffe l'élément thermo-électrique, la variation

de température des soudures donne naissance à une force électromotrice et par suite à un courant que fait dévier le cadre, comme dans le galvanomètre ordinaire. Cet appareil, qui permet d'effectuer des mesures précises, ne peut être employé que dans les laboratoires. Au contraire, les détecteurs thermiques à contact solide sont utilisés couramment dans des stations de réception.

Ils peuvent être généralement employés sans source auxiliaire, ce qui rend le montage particulièrement simple, et sont associés à un téléphone. Il existe en réalité deux catégories distinctes de détecteurs à contact solide, les détecteurs thermo-électriques et ceux qui fonctionnent comme soupapes et rectificateurs de courant. Dans les premiers, on associe un métal quelconque et la chalcopyrite, le bioxyde de manganèse ou le sulfure de cuivre artificiel ou naturel (chalcosine). Dans la seconde catégorie, on peut ranger les contacts carborundum-métal, molybdène-métal. Intercalés dans un circuit à force électromotrice constante, ces contacts donnent naissance, lors de l'inversion du signe de cette force électromotrice, à des courants de sens opposé. Ces appareils ont l'inconvénient de présenter une sensibilité extrêmement variable suivant les points en contact, de sorte qu'il faut les régler fréquemment pour trouver le « point sensible ». On peut donc ne rien entendre, ou entendre plus ou moins bien suivant la nature du contact.

Les détecteurs électrolytiques ne présentent pas ce défaut et on les associe souvent aux détecteurs à contact solide pour vérifier le fonctionnement de ces derniers. Ils sont constitués par deux électrodes polarisables, de surfaces inégales, immergées dans un électrolyte (fig. 185). Aux dimensions près, l'appareil est tout à fait analogue à l'interrupteur bien connu de Wehnelt. Mais la cathode est formée par un fil de platine N relativement gros, tandis que l'anode est constituée

par une électrode à la Wollaston, c'est-à-dire un fil de platine très fin scellé dans un tube de verre et ne sortant que très peu du tube. L'appareil est placé sur le circuit d'une pile auxiliaire et on dispose le circuit de réception, antenne-terre, et un téléphone en dérivation aux bornes M et N. Ces détecteurs sont beaucoup plus sensibles que les détecteurs magnétiques dont nous allons dire maintenant quelques mots et constituaient, avec les cohéreurs à contact solide, les appareils les plus sensibles connus jusqu'à ces dernières années.

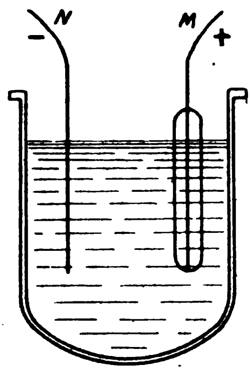


Fig. 185. — Dispositif d'un détecteur Wenhelt.

Les détecteurs magnétiques sont basés sur le phénomène suivant, découvert par lord Rayleigh et Rutherford : lorsqu'un corps magnétique, aimanté à saturation, est placé dans un enroulement dont les spires sont le siège d'oscillations électriques, il subit une désaimantation partielle et permanente.

Parmi les diverses réalisations proposées, nous ne signalerons que celles de Marconi (fig. 186). Une bobine B fixe a un noyau constitué par un ruban ou un câble simple d'acier qui est entraîné par deux poulies O, O', formant ainsi une chaîne sans fin. Le champ magnétisant est produit par deux aimants et disposé symétriquement par rapport à un enroulement secondaire, les pôles du même nom étant voisins. Le circuit de l'antenne et du téléphone est disposé comme l'indique la figure. Les ondes désaimantent partiellement le ruban de fer ou d'acier et par induction impressionnent le téléphone.

Les lampes audions. — Les nouveaux détecteurs utilisent

un tout autre ordre de phénomènes : l'effet Edison, découvert d'abord dans les lampes à incandescence et qui peut se traduire sous la forme imagée suivante : tout métal chauffé émet une buée de corpuscules électrisés négativement (électrons). Une application bien connue est l'ampoule à rayons X de Coolidge.

Dans cet appareil, en effet, au lieu de se servir comme véhicule de l'électricité pour le passage du courant des

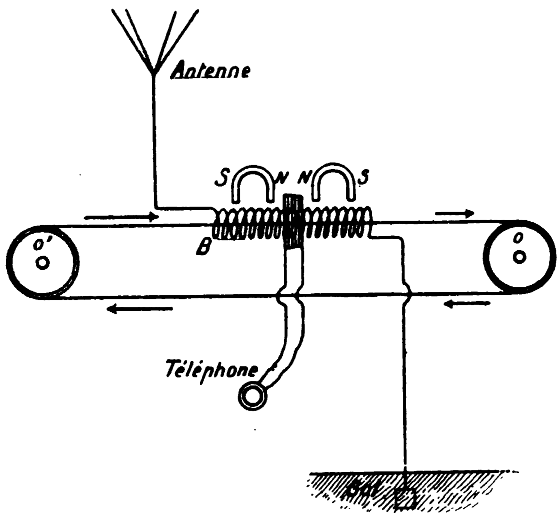


Fig. 186. — Montage du détecteur magnétique Marconi.

molécules gazeuses restant dans l'intérieur de l'ampoule, on utilise les électrons émis par la cathode chauffée par une résistance électrique, source calorifique auxiliaire. Le grand avantage de ce système est que l'émission d'électrons est rigoureusement fonction de la température ; par suite, en réglant convenablement le chauffage de la cathode, on obtient une émission de rayons X parfaitement constante et dont l'intensité peut être variée à volonté.

Si, dans l'ampoule à incandescence, on introduit une plaque métallique chargée positivement, il y aura attraction par cette plaque des électrons chargés négativement, et le flux d'électricité ainsi canalisé produira un courant entre le filament et la plaque, courant qui sera permanent si la plaque est maintenue à un potentiel positif par rapport au filament. Il suffit pour cela de la relier au pôle positif d'une batterie où le pôle négatif est connecté au filament.

Nous venons de dire qu'à chaque température du filament correspond, par unité de temps, l'émission d'un nombre donné d'électrons. Si la différence de potentiel entre le filament et la plaque est suffisante, tous les électrons seront captés par cette dernière. Le courant recueilli a sa valeur maxima. On dit alors que l'on a atteint la saturation.

En dessous de cette valeur, un nombre plus ou moins grand des électrons émis échappent à l'attraction de la plaque et le courant est plus faible. Si alors une cause extérieure vient modifier la différence de potentiel, l'attraction varie dans le même sens, par suite le nombre d'électrons captés et, par conséquent, l'intensité du courant suivent la même variation. On conçoit donc que si nous interposons un tel appareil dans le circuit d'une antenne lorsque les ondes viendront l'impressionner, la différence de potentiel variera entre la plaque et le filament et il en résultera une variation notable du courant électronique.

Mais on peut encore augmenter la sensibilité de ce dispositif. Supposons, en effet, que l'on place entre le filament et la plaque une électrode auxiliaire ayant la forme d'une grille.

Supposons que cette grille soit chargée négativement, elle a pour effet de créer un champ filament-grille antagoniste de celui existant entre le filament et la plaque. Les électrons captés par cette dernière seront donc en moins

grand nombre, et le courant recueilli moins intense qu'en l'absence de grille.

Si, au contraire, la grille est positive par rapport au filament, son action s'ajoute à celle de la plaque et, si elle arrête bien au passage quelques électrons, le courant finalement reçu par la plaque sera augmenté.

Si on s'arrange, par un réglage convenable des dimensions des trois conducteurs électriques dont nous venons de parler et de la valeur de la différence de potentiel, pour qu'une faible variation de cette différence de potentiel entraîne une grande variation de l'intensité du courant, on aura réalisé soit un détecteur, soit un amplificateur de très grande sensibilité.

Étudiés spécialement par Irving Langmuir en Angleterre, Lee de Forest aux États-Unis, le service radiotélégraphique de l'armée en France, les appareils utilisant le principe que nous venons d'indiquer sont extrêmement nombreux et ont reçu, suivant leurs inventeurs et les emplois auxquels ils sont destinés, comme détecteurs, amplificateurs, redresseurs de courants, etc., des noms multiples : audion, kenotron, pliotron, etc.

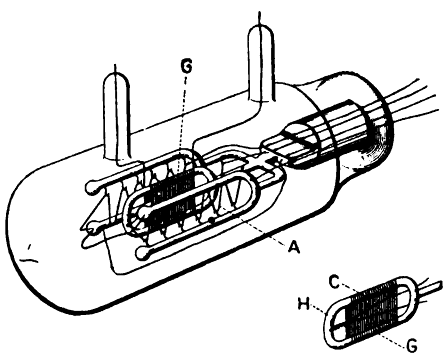


Fig. 187. — Pliotron de Langmuir.

La figure 187 montre un type de pliotron de Langmuir utilisé pour amplifier des signaux radiotélégraphiques dans une station de réception. Le filament est monté dans le centre d'un cadre constitué par des tubes de verre sur lesquels la

grille de fil fin, de $0^{mm},01$ de diamètre, est enroulée à raison de 100 tours par centimètre.

Le montage est facile à comprendre : le filament est chauffé à l'incandescence par une batterie d'accumulateurs dont le pôle négatif est relié d'une part à la grille par l'intermédiaire d'un transformateur genre téléphonique et d'autre part au pôle négatif d'une autre batterie. Le circuit de cette batterie se ferme par l'intermédiaire d'un téléphone sur la plaque (fig. 188).

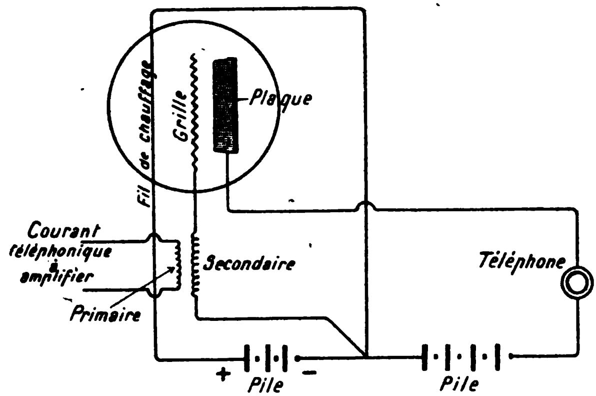


Fig. 188. — Schéma du montage d'un amplificateur.

Dans ces conditions, de très faibles courants circulant dans le primaire du transformateur développent entre les bornes du secondaire des variations considérables de potentiel qui entraînent de grandes variations de courant dans le circuit filament-plaque-téléphone. En mettant plusieurs amplificateurs en série, en constituant un appareil à 3, 6 ou 12 « étages », on arrive à une sensibilité extraordinaire.

Applications diverses des lampes audions. — Ces appareils peuvent aussi servir de détecteurs et de générateurs d'ondes. Pour l'emploi comme détecteur, on voit dans le

circuit de la grille un condensateur fortement shunté comme l'indique la figure 189. Quand des oscillations parcourent le circuit oscillant, au courant continu normal entre le filament et la plaque se juxtapose un courant dû à l'action de la grille. Dans ce cas, d'après les expériences de White, la sensibilité est encore accrue par la présence dans l'ampoule d'une petite quantité d'un amalgame mercure-argent.

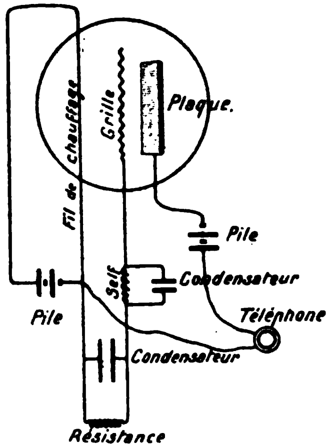


Fig. 189. — Autre montage de l'amplificateur.

On peut associer les ampoules à audions et les détecteurs ordinaires, par exemple les détecteurs à galerie, et on obtient un dispositif d'une sensibilité extrême.

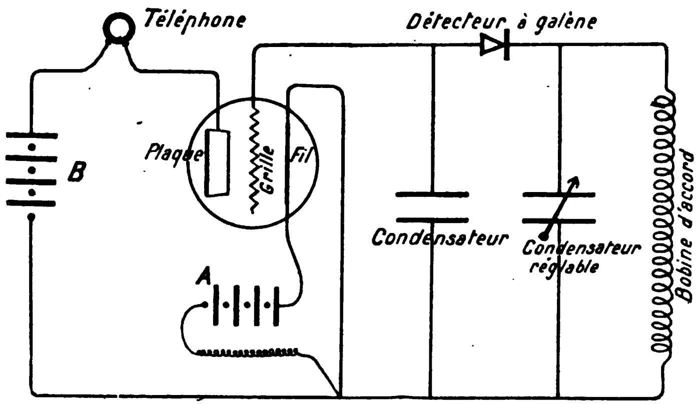


Fig. 190. — Montage d'un détecteur électronique et d'un détecteur à pyrite.

La figure 190 représente le montage réalisé par Haraden

Pratt qui a étudié complètement ce montage à l'Université de Californie.

Les signaux imperceptibles sont rendus parfaitement audibles lorsque la valeur de voltage de la batterie B est convenablement choisie. Dans ces conditions, des signaux de nuit ont pu être entendus des stations téléfunken de l'une des îles Marshall et de l'île de Yap du groupe des Carolines, stations distantes de San Francisco, l'une de 8 200 kilomètres, l'autre de 9 800. Ces distances sont tout à fait remarquables et exceptionnelles, mais la communication à 3 400 kilomètres a été pratiquement réalisée en tous temps.

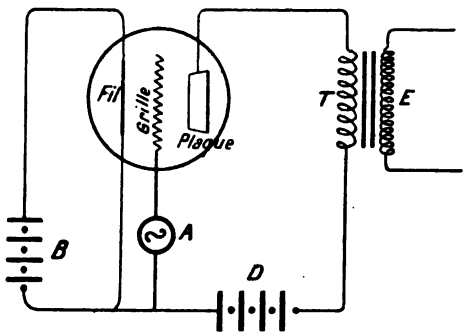


Fig. 191. — Montage de l'amplificateur comme oscillateur.

Remarquons d'ailleurs que le dispositif n'utilise qu'une seule ampoule amplificatrice.

Enfin, en plaçant un condensateur et une self dans les deux circuits de la grille, filament et grille-plaque, et en couplant ces deux circuits ensemble, on peut employer ces appareils comme sources d'oscillations continues.

Le principe de son emploi est indiqué sur la figure 191 qui représente le montage type. T est un transformateur dont le primaire est connecté à la plaque de l'ampoule, A est un alternateur fournissant un potentiel alternatif à la grille, D est la source de courant alimentant le circuit de la plaque, E est le secondaire du transformateur relié à l'antenne.

La fréquence obtenue dépend des constantes des circuits

et les méthodes de couplage, électrostatiques ou électromagnétiques ont été étudiées au laboratoire de la General Electric C° de Schenectady.

Pour avoir des courants de faible fréquence, il faut de grandes selfs et de grandes capacités. Par exemple, une self-induction de 101 henrys et une capacité de 25 microfarads donnent une période propre de 1 seconde. On utilise

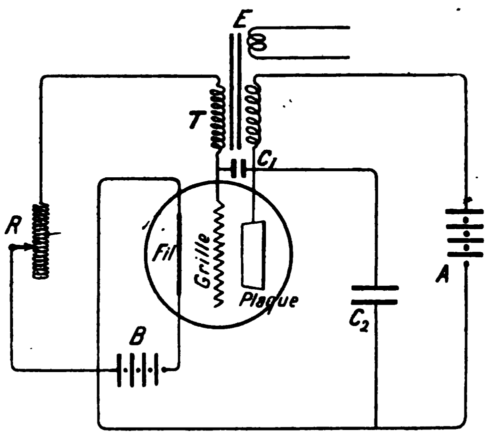


Fig. 192. — **Montage pour la production d'oscillations de basse fréquence.**

alors le montage représenté figure 192 étant donné le peu d'intensité des effets inductifs.

On a pu, grâce à ce dispositif, réaliser des courants de très basse fréquence, ce qui, dans certaines applications électrochimiques, peut être intéressant.

En réduisant au minimum la self-induction et la capacité, on arrive à produire des courants de très haute fréquence. Pratiquement la capacité des éléments de l'ampoule est plus que suffisante pour assurer le couplage et, par suite, il faut réduire au minimum les selfs des conducteurs du circuit.

La figure 193 montre la disposition permettant de réaliser

une fréquence d'émission de 50 millions à la seconde. Les self-inductions L_1,L_2 et la capacité C_1 ont pour but d'empêcher le passage des courants à haute fréquence à travers le générateur D. La self dans le circuit du plateau est la connexion *bcd* entre le filament et le plateau ; pour le circuit du filament c'est la connexion *efga* entre filament et grille. Ces deux connexions ont environ 1 décimètre de long.

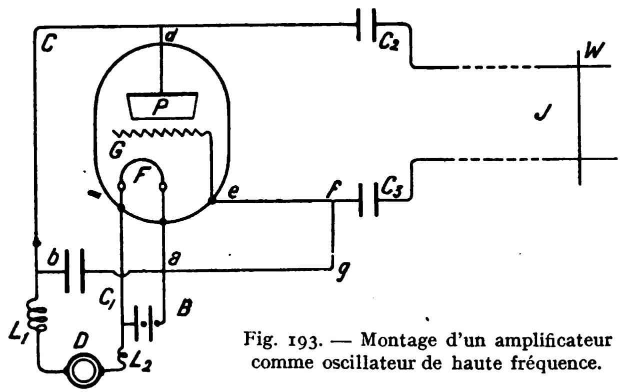


Fig. 193. — Montage d'un amplificateur comme oscillateur de haute fréquence.

Les capacités C_2 et C_3 réduisent l'effet de la capacité propre des fils sur le système oscillant.

Le réglage s'effectue en disposant entre les deux fils, dont la longueur doit être multiple de la longueur d'onde du courant de l'oscillateur, un pont W à contacts glissants.

On a pu réaliser une fréquence de 50 millions par seconde, ce qui correspond à une longueur d'onde de 6 mètres.

Nous n'entrerons pas dans de plus amples détails sur le fonctionnement de ces appareils qui ont déjà donné lieu à un grand nombre de travaux du plus haut intérêt. Il nous suffira d'en avoir indiqué le principe et nous terminerons en donnant quelques indications sur la sensibilité incroyable qu'ils possèdent.

Depuis le début des hostilités, dans toutes les armées belligérantes, le téléphone, s'il s'est révélé comme un auxiliaire précieux, s'est aussi montré indiscret et dangereux. En effet, dans les montages ordinaires, le retour du courant se fait par la terre ; même si on emploie des lignes à deux fils, l'isolement est toujours imparfait et une partie du courant se perd dans le sol. Les amplificateurs à lampe permettent de le recueillir et de surprendre ainsi les conversations de l'ennemi. Nous n'insisterons pas sur les montages permettant d'arriver à ce résultat ; disons simplement qu'il est très facile de surprendre à 400 ou 500 mètres d'une ligne téléphonique à un ou deux fils toutes les communications qui empruntent cette ligne. Ce mode de transmission a été dénommé T. P. S. (téléphone par le sol) dans le langage militaire.

De même, si, une ligne téléphonique étant coupée, on enfonce légèrement en terre les deux tronçons du fil coupé, on peut, en intercalant un amplificateur dans le circuit, rétablir la transmission même si la coupure est à 90 ou 100 mètres. Avec des antennes extrêmement réduites, des cadres de quelques mètres de côté, on recueille les dépêches radiotélégraphiques d'Amérique, etc... Naturellement, dans ce dernier cas, le nombre des « étages » d'amplificateurs est assez élevé et le montage compliqué ; mais il n'en est pas moins vrai que la réception des ondes est arrivée à un tel degré de perfection que les dimensions de l'antenne ne jouent plus qu'un rôle secondaire et que la portée des communications s'est accrue dans d'énormes proportions.

Le dynatron. — Le champ ouvert aux expérimentateurs par la réalisation des lampes amplificatrices est extrêmement vaste et, de plus, ces appareils se prêtent à des modifications nombreuses et variées. Nous donnerons simplement, à titre d'exemple, la description d'un tube à trois électrodes étudié par

M. Hull au laboratoire de la General Electric C° de Schenectady, auquel il a donné le nom un peu barbare de dynatron.

Ce tube (fig. 194), comme les amplificateurs ordinaires, comporte un filament chauffé générateur d'électrons, une plaque portée à un potentiel positif relativement faible (variable de 0 à 200 volts) par rapport au potentiel du pôle négatif du filament, pris comme zéro, et une troisième électrode, nommée anode, intercalée entre le filament et la plaque et située à petite distance de celle-ci. Cette troisième électrode est portée à un potentiel positif très élevé et invariable. Elle est constituée soit par une spirale de fil de gros diamètre enroulée autour du filament, soit par une plaque percée de trous.

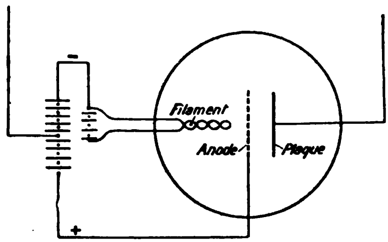


Fig. 194. — Schéma de dynatron.

Il existe donc, à l'intérieur du tube, deux champs électriques. Les lignes de force du premier, que nous appellerons champ primaire, vont de l'anode vers le filament, et celle du deuxième ou champ secondaire vont de l'anode vers la plaque. Le champ primaire a, dans le fonctionnement normal du dynatron, une intensité constante, puisque la différence de potentiel entre l'anode et le filament conserve une valeur positive élevée et invariable. Au contraire, l'intensité du champ électrique secondaire varie suivant la valeur de la différence de potentiel que l'on établit entre la plaque et le pôle négatif du filament.

Les électrons émis par le filament (que nous appellerons électrons primaires) remontent les lignes de force du champ primaire en allant du filament vers l'anode. Quelques-uns

traversent l'anode, en passant par les trous que cette anode présente, et pénètrent dans le champ secondaire, grâce à la vitesse qu'ils ont acquise dans le champ primaire. Mais ce champ secondaire s'oppose au mouvement vers la plaque de ces électrons et freine le mouvement, d'autant moins d'ailleurs que le potentiel positif de la plaque par rapport au filament a des valeurs plus élevées (puisqu'il en résulte alors des valeurs plus faibles pour la différence de potentiel entre l'anode et la plaque). Par suite, si l'on accroît de plus en plus le potentiel de la plaque, les électrons primaires qui, ayant franchi l'anode, atteignent la plaque, deviennent de plus en plus nombreux. Le courant dans le circuit filament-plaque (compté positivement de la plaque vers le filament à l'intérieur du tube), d'abord nul, croît progressivement avec le potentiel de la plaque (partie ascendante OA de la courbe de la figure 195).

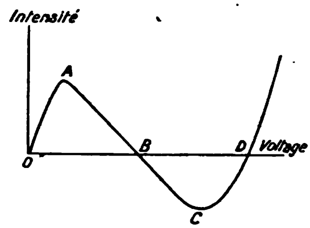


Fig. 195. — Caractéristique d'un dynatron.

Pour un certain voltage de la plaque, 25 volts par exemple, tous les électrons primaires qui traversent l'anode atteignent la plaque : le courant primaire est maximum. Si nous augmentons le voltage de la plaque, nous n'augmentons pas le nombre des électrons primaires atteignant la plaque, mais nous diminuons l'intensité du champ secondaire qui freine le mouvement des électrons ; ceux-ci perdant ainsi moins d'énergie cinétique pendant leur trajet de l'anode à la plaque, bombardent celle-ci avec une violence croissante. Leur choc ne tarde pas à devenir suffisamment brutal pour disloquer les molécules de la plaque qui, à son tour, commence à émettre des électrons, de même qu'une pierre frappée par

un obus se disloque et vole en éclats. Ces électrons émis par la plaque sous l'influence du choc des électrons primaires sont appelés, par M. Hull, électrons secondaires. Sous l'influence du champ électrique secondaire, ils se dirigent, aussitôt émis, de la plaque vers l'anode et constituent ainsi un courant électrique secondaire de sens opposé au courant des électrons primaires. Par suite, le courant résultant dans le circuit filament-plaque va cesser de croître pour décroître. Pour 100 volts sur la plaque, par exemple, il y a autant d'électrons primaires que d'électrons secondaires et le courant résultant est nul (point B, fig. 195). Pour des voltages de plaque supérieurs, il y a plus d'électrons secondaires émis par la plaque et attirés par l'anode que d'électrons primaires atteignant la plaque à travers l'anode ; le courant résultant s'inverse et prend des valeurs négatives de plus en plus grandes en valeur absolue.

Ce phénomène est tout à fait comparable à celui qu'on observerait en dirigeant un jet d'eau puissant vers un bassin plein d'eau. Le jet, s'il est suffisamment fort, au lieu d'accroître la quantité d'eau contenue dans le bassin, videra partiellement celui-ci en faisant jaillir en gerbe l'eau qu'il contenait. De même le faisceau d'électrons primaires, en bombardant la plaque, fait rejaillir les électrons, dits secondaires, que la plaque contient initialement.

A mesure que le champ électrique secondaire décroît, le nombre des électrons secondaires augmente, mais, comme la force qui tend à les mettre en mouvement (proportionnelle à l'intensité du champ secondaire) diminue, ils atteignent de plus en plus difficilement l'anode. Ceci explique que pour des voltages de plaque supérieurs à 150 volts, par exemple, le courant résultant cesse de décroître pour croître en prenant des valeurs négatives de plus en plus petites en valeur absolue, puis tend très rapidement vers une valeur limite

positive correspondant au nombre total des électrons primaires : cette valeur limite est atteinte lorsque le champ secondaire est trop faible pour mettre en mouvement les électrons secondaires émis par la plaque et que seuls les électrons primaires entrent en jeu.

La caractéristique du dynatron, c'est-à-dire la courbe du courant le traversant en fonction de la différence de potentiel établie entre ses électrodes (filament et plaque), courbe reproduite sur la figure 195, présente donc, entre les points A et C, une portion pour laquelle le courant décroît linéairement lorsque le voltage croît, c'est-à-dire que, dans les conditions de fonctionnement correspondant à la partie AC de la courbe, l'appareil se comporte *comme une résistance ohmique négative.*

Quand la différence de potentiel aux bornes augmente, l'intensité du courant dans le circuit diminue.

Or, on emploie fréquemment en télégraphie sans fil de telles résistances négatives comme amplificateurs de voltage, de courant (1), comme générateurs d'oscillations, et M. Hull

(1) Montrons comme exemple comment l'appareil peut amplifier le voltage. Il est en série avec une résistance R et aux bornes du circuit on applique une force électromotrice faible E. Par simple application de la loi d'Ohm on doit avoir, avec les notations de la figure 196,

$$e_1 = IR,$$
$$e_2 = Ie,$$
$$E = I(r + R),$$

r étant la résistance (négative du dynatron).

D'où :

$$\frac{e_1}{E} = \frac{E}{R + r}.$$

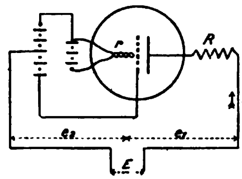


Fig. 196.

Or r est négatif ; donc $\frac{R}{R + r}$ est supérieur à 1, par suite e_1 est supérieur à a. Nous avons amplifié le voltage, et cela d'autant plus que $R + r$ est plus petit, c'est-à-dire que R a une valeur absolue plus voisine de r.

a utilisé avec succès son appareil légèrement modifié à la radiotéléphonie. C'est ainsi qu'il lui a été possible, avec un tube donnant environ 10 watts de débit, de téléphoner sans fil à une distance de 26 kilomètres dans de très bonnes conditions.

VII

APPLICATIONS DIVERSES

L'AUDITION ET LA GUERRE

Ce titre peut paraître à première vue étrange, mais si l'on réfléchit, on arrive vite à se convaincre que l'oreille est l'auxiliaire précieux de la vision et que les renseignements qu'elle fournit sont souvent des plus utiles.

Tout le monde sait maintenant que les poilus sont arrivés à une acuité auditive très perçante et qu'ils reconnaissaient non seulement le calibre des obus tirés sur eux, mais encore la direction du tir, et d'avance ils localisaient le point d'impact avec une grande précision. C'est qu'en effet, surtout pour les gros obus dont la vitesse est faible, inférieure à celle du son, le bruissement qui les accompagne dans leur trajet dans l'air est parfaitement caractéristique. Pour les obus de 210 et au-dessus, on entend le bruit du projectile depuis sa sortie de la bouche du canon jusqu'à son éclatement. Nous avons d'ailleurs eu l'occasion de discuter ce phénomène en traitant du son du canon.

Principe du repérage des batteries par le son. — Aussi les méthodes de repérage des batteries, qui ont rendu de si grands services, ont-elles pu utiliser cette propriété, mais, au lieu de l'observation imparfaite de l'oreille, c'est à des appareils enregistreurs très sensibles que l'on s'est adressé.

On comprendra que nous n'entrions pas ici dans la description du détail de leur fonctionnement.

Disons simplement que si une émission sonore, le bruit du départ du coup de canon par exemple, peut être enregistrée par deux écouteurs A, B situés à une distance connue

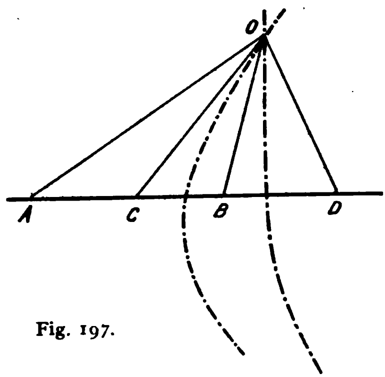


Fig. 197.

l'un de l'autre, il est possible, connaissant la vitesse de propagation du son dans l'air (330 mètres environ à la seconde) et la différence du temps d'audition, d'en déduire la différence de distance OA, OB. Un lieu du point O est donc une hyperbole de foyers A et B. Une même opération faite de deux autres stations C et D donne un second lieu. Le point de rencontre situe la pièce qui a tiré.

Le repérage par le bruit du projectile. — Mais bien des circonstances modifient les conditions d'audition du coup de départ, brouillard, vent, bois ou obstacles naturels, etc. Aussi, au lieu de fixer son attention sur le canon, essaye-t-on, dans d'autres méthodes, de se servir du bruit émis par le projectile lui-même. On comprend, sans qu'il soit nécessaire d'entrer dans de plus amples détails, qu'on peut déterminer des points de la trajectoire suffisamment nombreux pour la définir en grandeur et direction sans ambiguïté. Or, connais-

sant une portion de trajectoire, les tables de tir permettent de trouver la distance : le problème est donc résolu.

Il n'y a pas que les obus qu'il importe de surveiller avec l'ouïe, et la guerre de mines, qui a pris une si grande extension depuis que les opérations militaires sont devenues des opérations de siège, ne peut guère être conduite qu'à l'aide de l'oreille.

Écouteurs de mines. — Lorsque les sapeurs mineurs creusent une galerie souterraine, l'ennemi, qui est à l'affût, cherche à empêcher leur travail, soit en creusant une contre-mine, soit en établissant un camouflet, c'est-à-dire en forant un trou de 8 centimètres environ de diamètre dans la direction des mineurs, trou qui sera chargé d'explosif lorsqu'on le supposera venu au voisinage de la galerie en construction. L'explosion détruira celle-ci, ensevelissant les travailleurs.

Aussi faut-il les protéger. A cet effet, latéralement à la galerie, on creuse des amorces de petites galeries, des « rameaux » de quelques mètres dans lesquels un observateur muni d'appareils d'écoute essaye de surprendre le bruit des travaux de l'ennemi. Parfois même, autour de ce poste d'écoute, on fore des trous de 15 à 20 mètres disposés en éventail, au fond desquels on place des microphones et qui constituent des tentacules prolongeant ainsi la zone de protection. Les appareils employés sont aussi nombreux que variés comme principe. Ils utilisent tous la propriété homogène qu'a la terre, comme tous les milieux liquides et solides, de transmettre le son avec beaucoup plus d'intensité que l'air.

Si, par exemple, on dispose sur le sol un réservoir plein d'eau qui, par une membrane mince et flexible placée sur l'une de ses parois, est en communication avec un écouteur ou un cornet acoustique, le moindre tressaillement de la terre, même

à une distance assez grande, sera nettement perçu. En particulier, les coups de pioche des mineurs ennemis produisent à l'oreille l'impression de véritables chocs. Naturellement on peut varier la nature du liquide employé et la forme de la capsule manométrique pour obtenir la sensibilité maxima.

C'est par un mécanisme analogue que les anciens soldats étaient avertis de l'approche de la cavalerie ennemie. Sur un tambour placé au milieu de la route, et dont la peau était très tendue, ils disposaient de petits grains de sable qui entraient en danse lorsque la troupe montée ennemie se rapprochait.

D'autres détecteurs sont à fonctionnement électrique et leur principe est le même que celui des microphones téléphoniques ou des détecteurs de télégraphie sans fil. Un faible ébranlement d'un système électrique instable détermine une variation de résistance dans un circuit en équilibre. Le circuit étant ainsi perturbé, un courant électrique passera dans le téléphone écouteur et le mettra en vibration.

Le repérage acoustique des sous-marins. — Sur mer, pour la recherche et la découverte des sous-marins en plongée, ce sont encore des phénomènes acoustiques que l'on utilise. L'eau transmet en effet les sons à une vitesse de 1 500 mètres environ par seconde, et cela à de grandes distances. Aussi se sert-on de cette propriété en temps normal pour des usages pacifiques dans les phares sous-marins. Une cloche immergée dans l'eau est mise en vibration à intervalles donnés et le bateau muni d'écouteurs sous-marins, de simples microphones, se guide sur les sons qu'il perçoit pour rectifier sa route. L'avantage des phares sous-marins est évident en temps de brume, quand les signaux optiques ou sonores aériens ne sont plus transmis, car rien n'altère les propriétés acoustiques de l'eau.

On pourra donc très facilement, semble-t-il, saisir le bruis-

sement de l'hélice d'un sous-marin. Mais le problème en pratique est plus compliqué, car le bruissement du vent frôlant la surface de la mer, le clapotis de l'eau contre la coque du navire, le bruit des vagues, etc., viennent se juxtaposer au phénomène que l'on cherche à saisir et diminuent la netteté et la précision des indications. Trop sensible, l'appareil enregistre tout; trop amorti, il manque de puissance. Aussi cherche-t-on à « trier » les bruits perçus, tout comme en télégraphie sans fil on essaye d'éliminer les ondes parasites, en syntonisant l'appareil récepteur pour un certain son, caractéristique d'ailleurs, qui est celui de l'hélice du sous-marin.

Un autre procédé, encore à l'étude, mais dont les résultats auront un emploi intéressant en temps de paix, a été aussi proposé. Il consiste à localiser le corps immergé, le sous-marin pendant la guerre, l'iceberg pendant la paix, à l'aide de la réflexion d'ondes vibratoires mécaniques émises par le poste d'écoute. Ces ondes, qui vont s'éteindre à grande distance, s'il n'y a pas d'obstacle à leur propagation, reviennent au contraire en arrière, vers le poste émetteur, si elles ont rencontré un obstacle sur lequel elles se sont refléchies. D'après la direction, l'intensité, les caractéristiques en un mot de ces ondes réfléchies que l'on capte avec des appareils appropriés, on peut déduire la position exacte de l'obstacle.

La difficulté a surtout consisté dans la réalisation pratique de ces ondes vibratoires *mécaniques* de haute fréquence, de ces *ultra-sons*. On y est arrivé par l'emploi de phénomènes dont l'étude scientifique avait été faite par Pierre Curie.

Détection des avions. — On a en particulier utilisé pour cette détection la propriété bien connue des miroirs paraboliques de renvoyer les rayons réfléchis parallèlement à la

direction d'incidence. Nous avons vu que les projecteurs lumineux sont munis de miroirs paraboliques dans certains cas.

La propriété géométrique que nous venons d'énoncer reste vraie pour les ondes sonores.

On conçoit facilement que si, à l'aide d'un vaste miroir sonore parabolique, on recueille les bruits aériens, en cherchant, à l'aide d'un système microphonique, la direction suivant laquelle l'intensité du faisceau sonore réfléchi est maxima, on pourra fixer à très peu près la direction d'où proviennent les ondes sonores. Si un servo-moteur, analogue à ceux que nous avons décrits, relie ce système à un projecteur, en ouvrant le volet on aura chance que le faisceau lumineux frappe l'avion.

En aviation enfin, nous avons vu que les signaux acoustiques peuvent, dans certains cas, permettre les communications à distance. On se sert également, pour déceler et découvrir la nuit les zeppelins et les avions, du bruit des moteurs et des hélices.

LA TOUR EIFFEL ET LA GUERRE

Dans la guerre scientifique actuelle, la Tour Eiffel, plus qu'aucun autre monument de la capitale a contribué à la défense nationale, et son importance justifia le déploiement des forces militaires qui en éloignèrent les curieux.

Dans une conférence à la Société astronomique, M. Ch.-Ed. Guillaume, directeur du Bureau international des poids et mesures, qui a déterminé la dilatation et la déformation de la Tour sous l'action du vent, donnait sur elle quelques [illegible]ments intéressants que nous reproduisons :

[illegible] saisissons malaisément, dit-il, le sens des grands [illegible] ; il nous faut des comparaisons ; la Tour en suggère [illegible] frappantes.

« Pour la construire, on a utilisé 7 000 tonnes de fer, c'est là une quantité relativement minime.

« Supposons, en effet, une tour du même modèle, réduite au millième. Elle aura 30 centimètres de haut ; mais comme on devra ramener au millième toutes les dimensions, elle pèsera 7 grammes, autant qu'une feuille de papier à lettre.

« Supposons maintenant tout le fer de la Tour rassemblé dans une plaque uniforme, couvrant le carré de 125 mètres de côté qu'occupe la base de la Tour. Cette plaque n'aura qu'une épaisseur de 6 centimètres.

« Au carré qu'occupe la Tour, circonscrivons un cercle qui servira de base à un cylindre de 300 mètres de haut. Ce cylindre sera le plus petit qui puisse contenir la Tour tout entière. Son volume dépassera 7 millions de mètres cubes et l'air qu'il contiendra sera supérieur, en poids, au fer de la Tour ! »

La vitesse du vent fonction de l'altitude. — La Tour a servi à d'intéressantes études qui se sont trouvées avoir eu sur le développement de l'aéronautique une influence capitale. La station météorologique qui est installée à son sommet, étant absolument isolée dans l'atmosphère, a permis par exemple de comparer l'intensité et la direction du vent au sommet avec ce qu'elles sont au voisinage du sol. On a trouvé ainsi que des vents de 150 kilomètres à l'heure (40 mètres à la seconde) sont fréquents à quelque hauteur au-dessus du sol, tandis qu'au niveau du sol, un vent de 36 kilomètres à l'heure (10 mètres à la seconde) est un vent déjà très fort.

Tandis que la vitesse moyenne annuelle du vent au niveau des toitures, soit à 20 mètres du sol, est de 2 mètres par seconde, elle est, au sommet de la Tour Eiffel, de $8^{m},5$ par seconde, soit quatre fois plus qu'au niveau des maisons.

Ce ralentissement de la vitesse du vent au contact de la

terre est dû au frottement de ses molécules contre les aspérités qui hérissent le sol. Il se produit un freinage automatique comme celui qu'exerce un sol rugueux sur les roues d'une automobile que l'on vient de bloquer, tandis que loin



Fig. 198. — Les appareils de réception.

A, boîte de condensateurs réglables ; B, potentiomètre sur détecteur électrolytique ; C, D, condensateurs : E, détecteur à cristaux ; F, F, microphones téléphoniques.

du sol, cessant d'être gêné dans son mouvement, le fluide aérien reprend sa vitesse normale.

C'est pour cette raison que l'on ressent la brise au voisinage des grands lacs et de la mer dont les aspérités, infiniment moins nombreuses et moins rudes que celles de la terre, diminuent moins la vitesse du vent. Ainsi, dans l'Atlantique la vitesse des vents alizés est de 7 à 8 mètres par seconde, soit 28 kilomètres à l'heure ; à 300 mètres de hauteur, elle est seulement le double, soit 55 à 60 kilomètres à l'heure.

A toutes ces variations du vent, il faut ajouter les varia-

tions suivant l'heure de la journée. Il y a en général chaque jour un maximum et un minimum de la vitesse du vent : le maximum a lieu un peu après midi et le minimum aux environs de minuit. Conséquence pratique, le vent est plus faible un peu avant le coucher du soleil et, par suite, c'est à cette



Fig. 199. — La salle de l'éclateur à la Tour.

B, batterie de condensateurs : C, rouleaux de l'éclateur ; D, self, induction de réglage.

heure que les aéroplanes pourront sortir dans les meilleures conditions.

La différence entre la vitesse maxima et la vitesse minima du vent dans une même journée est en général, pendant l'été, double de ce qu'elle est en hiver.

Mais si nous nous élevons, loin du sol l'ordre des variations est inverse : c'est le minimum de vitesse qui a lieu pendant le jour et le maximum pendant la nuit.

Visible de 60 à 80 kilomètres par temps clair, la Tour est le phare diurne qui guide les aviateurs vers Paris.

Quant à l'importance qu'elle a prise dans les recherches aérodynamiques, on la comprendra sans peine lorsque nous aurons dit que les premières études de quelque importance sur la résistance de l'air ont été faites en utilisant la hauteur de 120 mètres qui sépare la seconde plate-forme du sol, et qu'elle sert encore journellement pour l'essai et la mise au point d'un grand nombre d'engins de l'aviation.

La portée de la télégraphie sans fil de la Tour. — Mais ce ne devait pas être là le seul service rendu par la Tour. La télégraphie sans fil a trouvé en elle une antenne merveilleuse qui lui permet de communiquer avec nos colonies et nos alliés en même temps que d'envoyer aux navigateurs les signaux horaires et aussi d'intercepter les messages sans fil allemands adressés à des stations plus ou moins clandestines, qui étaient nombreuses malgré tous les efforts faits par les neutres pour les supprimer.

L'antenne de la Tour se compose d'une nappe de six conducteurs aériens. L'extrémité supérieure de chaque fil aboutit à trois isolateurs successifs en porcelaine amarrés aux arcades surmontant la troisième plate-forme. Des câbles tendeurs avec interposition d'isolateurs spéciaux prolongent les portions actives de ces conducteurs. Sur chacun de ces derniers, viennent se fixer des fils de jonction, qui se réunissent à une cinquantaine de mètres du sol, en un seul faisceau maintenu par un large collier isolant en caoutchouc et pénétrant dans la salle de haute tension.

Un certain nombre de plaques de zinc enfouies dans le sol, et dont la surface totale atteint plusieurs centaines de mètres carrés, constituent la prise de terre. Quant à la période propre d'oscillation de l'antenne totale, elle correspond à une longueur d'onde de 2 000 mètres environ.

La station de la Tour Eiffel comprend deux postes d'émission : l'un de 75 chevaux à étincelles rares, l'autre de 15 chevaux à étincelles musicales.

Après avoir traversé la salle de manipulation sous un voltage non dangereux, le courant arrive dans la salle de haute tension entièrement capitonnée d'une double épaisseur de tentures feutrées, afin d'amortir le bruit des décharges électriques. Le transformateur charge, sous une tension de 110 000 volts environ, le condensateur du circuit oscillant comprenant 896 tubes Moscicki de 6 centimètres de diamètre et 1 mètre de long.

L'ensemble forme une capacité de 1 microfarad et peut être chargé à 110 000 volts.

L'étincelle produite est longue de 30 à 35 millimètres entre les cylindres de zinc de l'éclateur mis en mouvement par une petite dynamo auxiliaire. Le gros serpentin de cuivre rouge, disposé entre celui-ci et l'antenne, sert à régler l'accouplement des postes transmetteur et récepteur. La Tour Eiffel possède un poste à étincelles musicales : avec l'alternateur à résonance Béthenod (10 kilowatts), on peut produire des décharges très rapprochées (400 à 500 à la seconde) qui détermineront dans le récepteur téléphonique non plus un roulement, mais un son musical.

On sait les services précieux que rend ce mode de transmission.

Ajoutons, pour finir, que ce n'est pas la Tour Eiffel, mais le poste de Lyon qui assurait nos communications avec l'armée d'Orient.

LA RECHERCHE DES PROJECTILES DANS L'ORGANISME

La question si importante de la recherche et de la localisation dans les blessures de guerre des projectiles divers, balles, éclats d'obus ou de shrapnell, a fait l'objet, depuis le début des hostilités, d'un grand nombre de mémoires et de méthodes différentes. Nous n'avons pas l'intention de les passer toutes en revue, surtout qu'au point de vue physique elles sont très analogues. On peut les diviser en deux groupes : dans le premier, nous rangerons les procédés électriques : balances d'induction, électrovibreur de Bergonié, sonde magnétique, etc. ; le second groupe comprendra les méthodes radiologiques que la guerre a amenées à un degré de perfectionnement remarquable, surtout depuis que l'emploi des nouvelles ampoules ultra-puissantes de Coolidge a pu se généraliser.

Méthodes électriques.

Électrovibreur de Bergonié. — Depuis quelques années, le professeur Bergonié avait appliqué l'électro-aimant à l'extraction des corps étrangers magnétiques que, dans certaines industries, les ouvriers sont exposés à s'introduire accidentellement dans les yeux.

Lorsqu'il s'agit non plus d'extraire les paillettes métalliques des yeux, mais bien les éclats d'obus des plaies de guerre, le professeur Bergonié modifia son appareil en conséquence. En effet, si nous nous reportons au tableau pages 291 et 292, nous constatons que si l'aimant est sans action sur les balles de Lebel, sur celles des revolvers, sur les balles de plomb des shrapnells, en revanche, les balles ennemies, S et U allemandes, celles des pistolets Parabellum et Maennlicher autrichiens et les éclats des obus d'acier sont très magnétiques.

DÉSIGNATION DU PAYS ET DE L'ARME.	NOYAU.	CHEMISE.	POIDS (en gr.).	LONGUEUR en mm.	DIAMÈTRE en mm.
I. — Pays alliés.					
France, Lebel 1886-1893. 8 mm. Balle S,	Plomb durci.	Cuivre nickelé.	15,0	30,3	7,72
Balle D (massive)....	Tout cuivre.	Tout cuivre.	12,8	39 2	8,0
Angleterre, fusils Lee Metford et Lee Enfield M. 1889-91. cal. 7mm,7	Plomb antimonieux à 5 p. 100.	Cuivre nickelé.	14	31	7,87
Belgique, Mauser, M. 1889, cal. 7mm,65.	Plomb antimonieux à 2 p. 100.	Cuivre nickelé.	14	30	7,95
Italie, Paravicino-Carcano, M. 1891, cal. 6mm,5.	Plomb antimonieux à 5 p. 100.	Cuivre nickelé.	10,5	29	6,75
Japon. Arisaka, M. 1905, cal. 6mm,5.	Plomb mou.	Cuivre nickelé.	8	32,5	6.6
Portugal, Mauser. M. 1904, cal. 6mm,5.	Plomb antimonieux à 5 p. 100.	Cuivre nickelé.	10,1	32	6.7
Russie. Mossin M. 1891. Balle S, cal. 7mm,62.	Plomb antimonieux à 2 p. 100.	Acier fondu couvert de cuivre nickelé.	9.0	25,5	7,85
Serbie, Mauser, M. 1899, cal. 7 mm.	Plomb antimonieux à 2 p. 100.	Acier fondu couvert de cuivre nickelé.	11.2	30,8	7,25
II. — Principaux pays neutres.					
États-Unis d'Amérique, M. 1903, cal. 7mm,62.	Plomb antimonieux à 2 p. 100.	Acier fondu et cuivre nickelé.	9,7	27,8	7,85
Danemark. Krag-Jörgensen, M. 1908. cal. 8 mm.	Plomb mou.	—	12,7	31,5	8,22
Espagne, Mauser, M. 1893. Balle S, cal. 7 mm.	Plomb antimonieux à 2 p. 100.	—	10	30,8	7,20
Hollande, Maennlicher, M. 1893, cal. 6mm,5.	Plomb antimonieux à 2 p. 100.	—	10,2	30 9	6,65
Grèce, Maennlicher-Schœnauer, M. 1903, cal. 6mm,4.	Plomb antimonieux à 5 p. 100.	—	10,25	31.8	6,7
Norvège. Krag-Jörgensen, Mod. 1896, cal. 6mm,5.	Plomb antimonieux à 2 p. 100.	—	10,1	32,5	6,7
Roumanie, Maennlicher, M. 1893, cal. 6mm.5.	Plomb antimonieux à 5 p. 100.	—	10,25	31.8	5,65
Suède, Mauser, M. 1896, cal. 6mm,5.	Plomb antimonieux à 5 p. 100.	Cuivre nickelé.	10,1	32	6,7
Suisse, Schmidt Rorbin, M. 1890-1903, cal. 7mm,5 .	Plomb antimonieux à 2,5 p. 100.	Acier fondu et cuivre nickelé.	11,3	34,3	7,82

DÉSIGNATION DU PAYS ET DE L'ARME.	NOYAU.	CHEMISE.	POIDS (en gr.).	LONGUEUR en mm.	DIAMÈTRE en mm.
III. — PAYS ENNEMIS.					
Allemagne, M. 1888, Balle S, cal. 7mm,9.	Plomb antimonieux à 2,5 p. 100.	Acier fondu et cuivre nickelé.	10	28,0	8,22
Autriche-Hongrie. Maennlicher, cal. 8 mm.	—	—	»	»	»
Bulgarie, calibre 8 mm.	—	—	»	»	»
Turquie. Mauser, M. 1903, cal. 7mm,65.	—	—	»	27,5	7,92

Le procédé d'examen est très simple. L'électro-aimant est déplacé au-dessus du sujet. Le chirurgien, qui doit opérer avec des instruments non magnétiques (maillechort et acier-nickel à 25 p. 100), décèle très aisément l'existence du corps étranger : le patient ressent une douleur caractéristique et la peau se soulève en formant un cône très pointu. On procède ensuite facilement aux extractions des projectiles insérés sous la peau ou dans les muscles. Quelquefois certains éclats, tels que des fragments d'obus rugueux, la présence du sang ou enfin des contractions musculaires compliquent l'intervention chirurgicale et l'on a fait des réserves au sujet de la généralisation possible de cette méthode.

Aussi le professeur Bergonié a-t-il remplacé l'électro-aimant à courant continu par un « électrovibreur », appareil analogue, mais calculé pour être alimenté avec un courant alternatif.

Dans ces conditions, le corps métallique est mis en vibration par suite des attractions et des répulsions qu'il éprouve chaque fois que le courant de l'électro-aimant change de sens. En promenant l'électro-aimant au-dessus de la région dans laquelle on soupçonne la présence d'un corps étranger et en

palpant légèrement avec les doigts la surface de la peau, on ressent, sitôt que l'on approche du corps étranger, un fré-

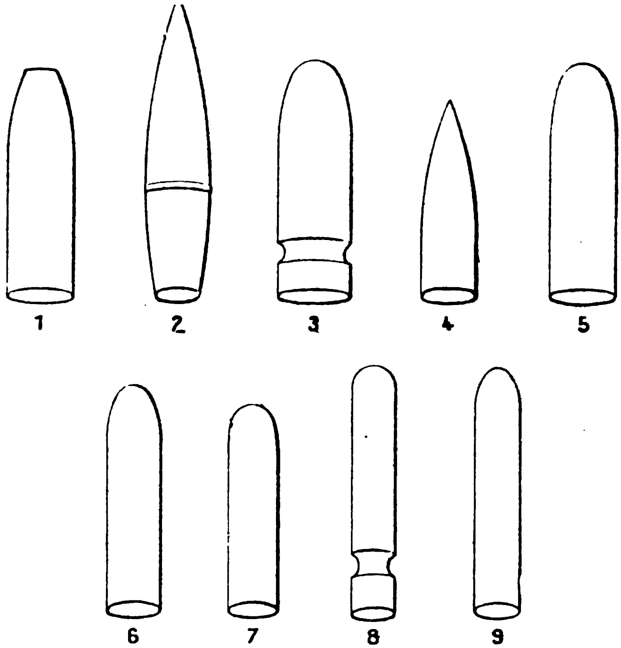


Fig. 200. — Les projectiles des principaux fusils en usage dans les armées alliées :

1. *France*, balle S. — 2. *France*, balle A. — 3. *Angleterre*, fusils modèle 89-91. — 4. *Russie*, fusil modèle 91. — 5. *Belgique*, Mauser, modèle 1889. — 6. *Serbie*, Mauser, modèle 1899. — 7. *Italie*, Paravicino-Carcano, 1891. — 8. *Japon*, Brisaka 1905, Mauser 1904. — 9. *Portugal*.

missement dont l'intensité, maxima lorsqu'on est en son voisinage immédiat, permet de le localiser très exactement.

Le faible magnétisme du cuivre ou des autres métaux, qui les soustrait à l'action de l'électro-aimant ordinaire, est suffisant, avec l'électrovibreur, pour permettre au chirurgien

de les déceler immédiatement. Les appareils ordinaires,

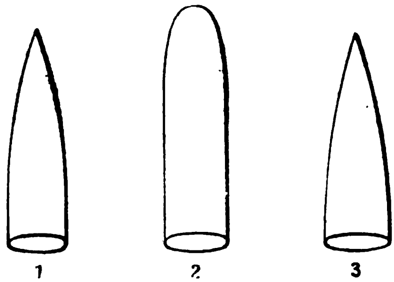


Fig. 201. — Les principaux projectiles des fusils en usage dans les armées ennemies.

1. *Allemagne*, 1888. — 2. *Autriche-Hongrie*, Maennlicher, et aussi, depuis, des balles du type allemand précédent. *Bulgarie*, balles des deux types précédents. — 3. *Turquie*, Mauser 1903 (et aussi des projectiles des types précédents, employés, bien entendu, dans leurs fusils respectifs).

avec un courant de 40 ampères, ont une zone d'action telle

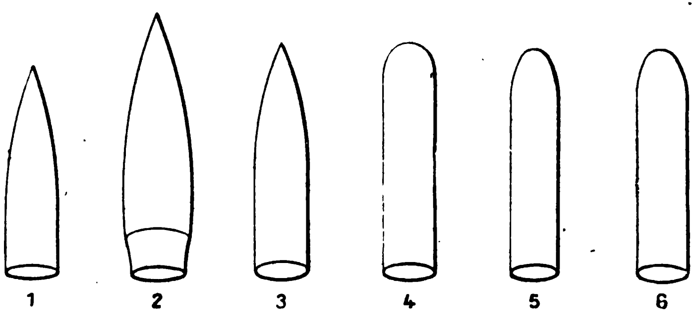


Fig. 202. — Les principaux projectiles en usage dans les armées de quelques pays autres.

1. *Etats-Unis d'Amérique*, M. 1903. — 2. *Suisse*, M. 1903. — 3. *Espagne*, Mauser 1893. — 4. *Grèce*, Maennlicher-Schœnauer, 1903. — 5. *Pays-Bas*, Maennlicher 1893. — 6. *Roumanie*, Maennlicher 1893.

qu'un très petit éclat situé à une profondeur de 5 centimètres est parfaitement repérable.

Méthodes radiographiques.

Si ingénieuses que puissent être les méthodes précédentes, elles ne peuvent remplacer celles découlant de l'emploi des rayons X. Le succès de ces dernières est tel que toutes les



Fig. 203.

formations de quelque importance ont un poste de radiographie.

Des voitures automobiles spéciales (fig. 203), comprenant une dynamo mue par le moteur à pétrole et envoyant le courant dans le transformateur qui alimente l'ampoule à rayons X, permettent d'installer rapidement une salle d'examen radiographique sur le terrain.

La puissance de ces installations a d'ailleurs été grandement augmentée par suite de l'emploi des nouvelles ampoules dont nous allons dire quelques mots.

Les ampoules Coolidge. — Lorsqu'on fait passer une décharge électrique dans un tube de verre où règne une pression de l'ordre du millième de millimètre, l'intérieur de l'ampoule reste sombre, mais les parois deviennent par endroits phosphorescentes : l'électrode négative émet des rayons cathodiques constitués par des électrons projetés à grande vitesse suivant une trajectoire rectiligne perpendiculaire à la surface d'émission.

Lorsque ces particules frappent les parois du tube, le

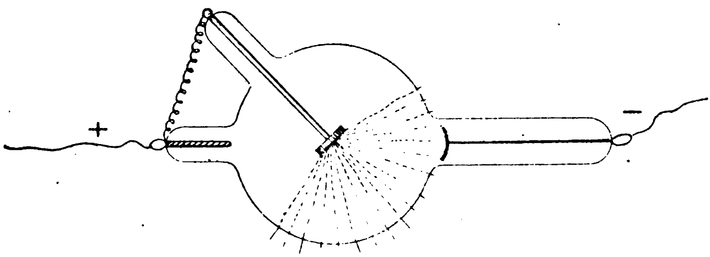


Fig. 204. — Ampoule à rayons X avec anticathode.

point d'impact devient le centre d'un rayonnement secondaire qui constitue les rayons X.

Le plus souvent la cathode d'une ampoule à rayons X est formée par un petit miroir concave ; l'anode est placée en un point quelconque, mais on dispose au foyer du miroir une petite surface plane, l'*anticathode*, sur laquelle sont concentrés, par suite, les rayons cathodiques et qui devient le centre d'émission des rayons X.

Le courant électrique ne traverse l'ampoule dans laquelle règne un vide très poussé que par un mécanisme spécial, l'ionisation. Sous l'action du champ électrique créé lorsque l'on établit une différence de potentiel entre les deux électrodes, les molécules de gaz s'ionisent, c'est-à-dire se séparent en un noyau positif ou ion, de masse appréciable, et en un

élément négatif qui n'est autre que l'atome d'électricité, l'électron. Le bombardement de la cathode par les ions désagrège partiellement le métal et libère encore des électrons qui s'échappent suivant les lignes de force, c'est-à-dire normalement à la cathode.

Si le gaz se raréfie tellement à l'intérieur de l'ampoule qu'il disparaisse complètement, ce qui arrive au bout d'un certain temps de fonctionnement de l'ampoule, les molécules gazeuses allant se coller sur les parois auxquelles elles adhèrent fortement, le mécanisme du passage du courant que nous venons de décrire ne peut plus fonctionner, les émissions cathodiques se raréfient, la production des rayons X s'arrête, le tube est devenu *dur*.

Ajoutons que, suivant l'état du vide à l'intérieur du tube, les rayons de Rœntgen émis ont des propriétés différentes. Lorsque le tube est *mou*, c'est-à-dire que le vide est peu poussé, les images photographiques que donnent les rayons X émis sont riches en contrastes, mais les rayons X sont faibles, peu pénétrants et ils ne traversent que des obstacles peu épais.

Les tubes *durs*, au contraire, donnent des rayons très pénétrants.

De nombreux moyens ont été proposés pour « régénérer » les tubes durcis (soupapes de Villars, etc.), mais il n'en reste pas moins vrai qu'un tube à rayons X se modifie à chaque instant, qu'au cours du fonctionnement les propriétés de ses radiations varient et qu'il est impossible d'obtenir à un moment donné quelconque, avec une ampoule donnée, des rayons X de pénétration déterminée.

Ampoule Coolidge. — C'est ce que l'on peut obtenir maintenant avec les nouvelles ampoules dues au physicien américain Coolidge et qui fonctionnent sur un autre principe. Dans ces ampoules, le vide est poussé aussi loin que les moyens

actuels nous le permettent, c'est-à-dire que l'on cherche à réaliser un tube si dur que la décharge électrique ne le traverse pas.

Pour ioniser le tube, on s'appuie alors sur une propriété

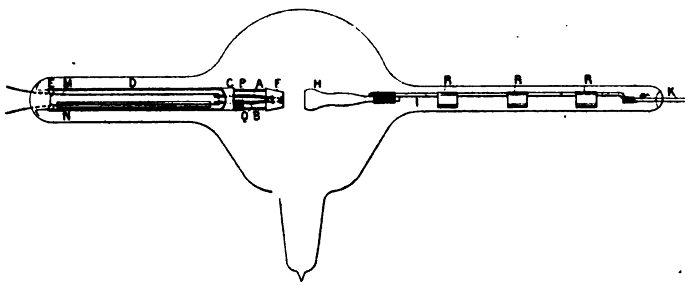


Fig. 205. — Ampoule Coolidge.

des métaux chauffés, découverte par Richardson. Ce physicien a montré que les corps incandescents émettent des électrons suivant une loi bien déterminée de la température qui est

$$q = a \sqrt{T}\, e^{-\frac{b}{T}}$$

q étant le nombre d'électrons émis par seconde par un filament à la température T ; a et b des constantes ; e, la base des logarithmes népériens.

L'émission des électrons est obtenue dans le tube Coolidge par chauffage électrique de la cathode, ce qui permet de doser à volonté la quantité de rayons X émis en agissant simplement sur le courant de chauffe de la cathode. Le dispositif pratique est le suivant (fig. 205),

Un filament de tungstène enroulé suivant une spirale plane est échauffé par le passage du courant amené par les tiges de molybdène A et B et alimente l'ampoule en cor-

puscules électriques. Les tiges de molybdène sont prolongées par deux fils de cuivre soudés, pour le passage à travers le verre de l'ampoule, à deux fils de platine. Les tiges de molyb-

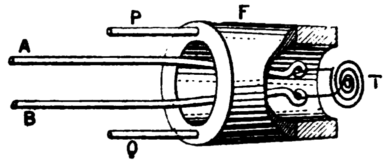


Fig. 206. — Détail de la cathode et de son mode de chauffage.

dène sont scellées dans une pièce de verre spécial C servant de support et ayant même dilatation que le molybdène.

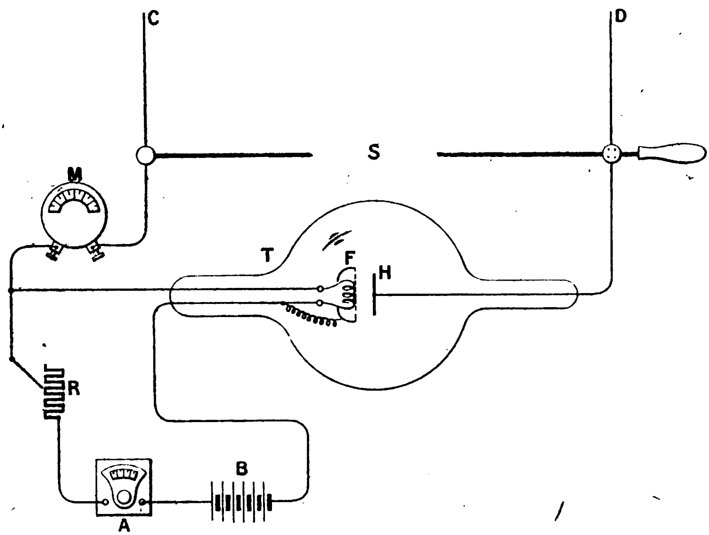


Fig. 207. — Montage d'une ampoule à rayons X de Coolidge.

Pour tenir compte de la différence de dilatabilité entre l'enveloppe et cette pièce et éviter la rupture, on a intercalé entre E et C toute une gamme de verres intermédiaires D.

Le courant de chauffe varie de 3 à 5 ampères et la température du filament de 1 870 à 2 540 degrés. La cathode est formée par un tube cylindrique en molybdène, supporté par deux tiges P, Q de molybdène soudées à la pièce de verre C. L'une de ces deux tiges est de plus soudée à la tige conductrice B, et sert ainsi à former le pôle négatif de l'ampoule.

L'anode H sert également d'anticathode ; elle est en tungstène fondu, et reliée au pôle positif de la source de courant par un fil de molybdène I ; ce dernier repose sur des blocs de molybdène R, R, R, remplissant tout le tube ; leur but principal est de refroidir suffisamment le filament pour qu'à la soudure K il ne présente pas une température excessive, nuisible à l'étanchéité.

Diverses modifications ont été apportées à ce modèle

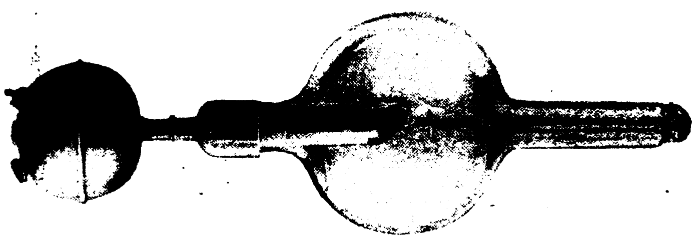


Fig. 208. — Ampoule Coolidge perfectionnée par M. Pilon.

en particulier par M. Pilon, surtout en ce qui concerne le refroidissement.

L'anode, entourée d'un refroidisseur à eau, est constituée par un gros bloc de tungstène supporté par un tube de molybdène. La cathode est une spirale en fil de tungstène soutenue par deux tiges de molybdène (fig. 206).

Le rayonnement secondaire. — Lorsqu'un rayon X frappe un corps, ce corps émet à son tour un autre rayonnement X, dit rayonnement secondaire, qui est d'autant plus pénétrant que le rayonnement incident était lui-même

plus pénétrant. La netteté des images se trouve, par suite de ce phénomène, considérablement diminuée ; la multiplicité des sources entraîne la multiplicité des images, d'où la formation de pénombre.

Deux sources seulement de rayonnement secondaire sont

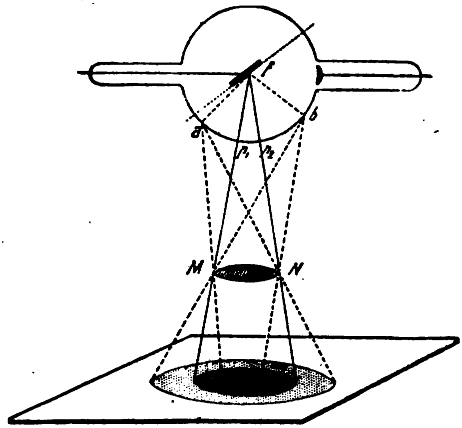


Fig. 209. — Soit MN l'objet à radiographier. Nous voyons que chacun des foyers *a*, *b*, de rayonnement secondaire disséminé sur les parois de l'ampoule, fournira une pénombre, et nous concevons la diminution de netteté de l'image qui en peut résulter. L'existence d'une *cupule* en substance opaque aux rayons, sans laquelle on ne doit plus aujourd'hui utiliser une ampoule, diminue déjà notablement l'influence du rayonnement secondaire émané des parois de l'ampoule, comme on le comprend en examinant la figure suivante.

à envisager dans la pratique : la première est constituée par la paroi même de l'ampoule et la seconde par le corps à radiographier.

La figure 209 montre l'effet nocif de la paroi de l'ampoule sur la netteté de l'image et la figure 210 indique comment on peut le corriger en entourant le faisceau de rayonnement issu de la cupule d'un cylindre appelé *diaphragme*, de pro-

portions convenables pour qu'aucun rayon parasite n'arrive sur l'écran d'observation.

La radioscopie. — Deux méthodes se présentent immé-

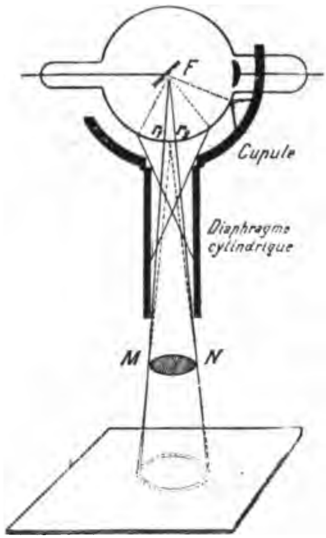


Fig. 210. — La cupule arrête déjà une notable partie du rayonnement secondaire. Le diaphragme-cylindre élimine l'action, nocive pour la netteté de l'image, de tous les rayons secondaires qui sortent par l'ouverture de la cupule et ne sont pas compris dans le cône r_1Fr_2. Ils se trouvent arrêtés sur ses parois si le tube est assez long et assez étroit. Quant aux rayons secondaires nés sur la zone r_1r_2 de la paroi de l'ampoule et inscrits dans le cône Fr_2, ils seront d'autant moins gênants par la faible pénombre qu'ils peuvent produire que le diaphragme sera plus long et plus étroit.

diatement à l'esprit pour examiner les blessures à l'aide des rayons X : la *radioscopie,* qui est l'étude des ombres projetées sur un écran fluorescent de platinocyanure de baryum par un faisceau de rayons X sur le trajet duquel est disposée la région à examiner, et la *radiographie,* qui donne une image photographique et fournit un document pouvant servir de

base à des calculs précis de repérage et à l'examen approfondi des lésions révélées.

Ces méthodes sont connues et nous n'en dirons rien. Mais il est un problème nouveau soulevé par la nature même des blessures à traiter qui a, depuis la guerre, pris une impor-

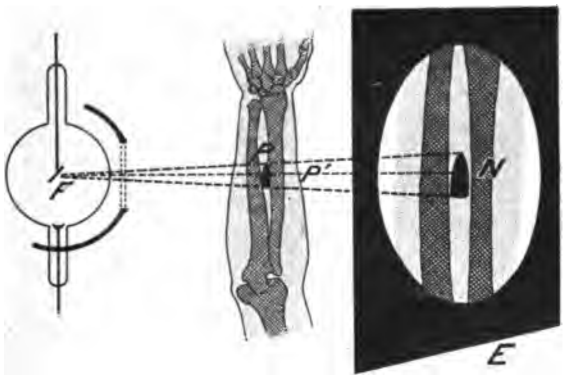


Fig. 211. — Cette figure montre le principe de la radioscopie et la disposition relative de l'ampoule, de l'objet à examiner et de l'écran d'observation.

tance considérable et dont les solutions sont presque aussi nombreuses que le nombre des radiographes ; nous voulons parler de la localisation des corps étrangers. L'écran ou la photographie les révèlent, mais à quelle profondeur sont-ils situés dans les tissus? C'est la question qu'il faut résoudre.

Un point est déterminé en position dans l'espace par un ensemble de conditions qui, mathématiquement, équivalent à trois conditions. Il faut, soit connaître les trois coordonnées du point par rapport à trois axes de repérage, soit connaître en position deux droites qui passent par ce point, soit déterminer une droite et la distance du point à un plan connu, soit connaître les distances de ce point à trois points connus, etc...

Chacun de ces modes de détermination peut conduire à un moyen de localisation des projectiles. Les épures seront

plus ou moins simples, le calcul plus ou moins long, mais, mathématiquement, la précision est la même. Sans entrer dans le détail de toutes les méthodes pratiques qui ont été proposées, nous allons dire quelques mots des plus caractéristiques pour montrer comment les chirurgiens les ont appliquées.

Comme exemple, supposons qu'il s'agisse de localiser

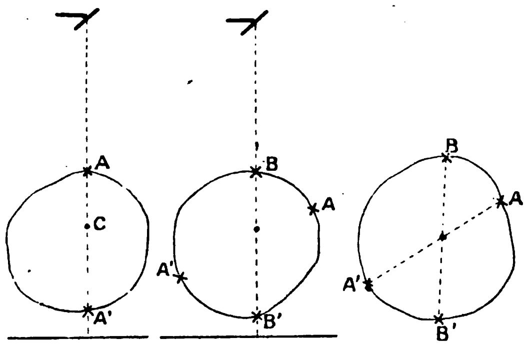


Fig. 212. — **Exemple de localisation d'un projectile dans la boîte cranienne.**

un projectile C dans la boîte cranienne (fig. 212). On place le blessé dans une position déterminée et, lorsqu'on aperçoit nettement le projectile, on amène la pointe d'un crayon muni d'une douille métallique le rendant très visible sur l'écran, de façon que son ombre coïncide avec celle du projectile. On marque alors le point d'entrée A. On détermine de la même façon le point de sortie A′ du rayon « projetant » le corps C sur l'écran. On répète la même opération, le sujet ayant tourné sur lui-même d'un certain angle, l'ampoule restant dans la même position que précédemment. La nouvelle droite BB′ que l'on détermine ainsi donne, par son intersection avec AA′, la position exacte du point C.

L'opérateur encercle alors la tête du malade d'une bande

métallique souple à la hauteur des repères et marque ces points sur la bande, puis il reporte sur une feuille de papier

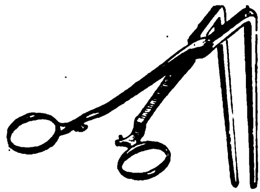


Fig. 213. — La pince à angle droit de Wullyamoz.

les contours qu'il vient de relever, réunit les points de repère deux à deux et localise ainsi le projectile. Ensuite, il étudie les voies d'accès les plus favorables pour arriver jusqu'à lui.

Méthode du Dr Wullyamoz. — Particulièrement utile lorsque l'on ne dispose pas du temps ou du matériel néces-

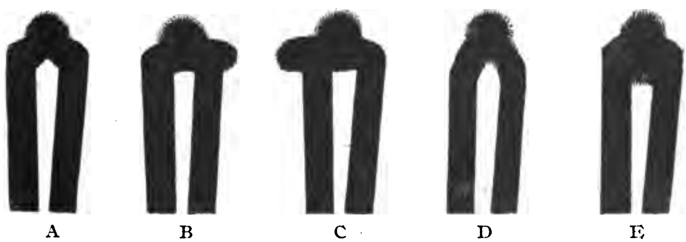


Fig. 214.

A. La pince coudée va à la recherche du corps étranger et est ici exactement dirigée sur le corps étranger. — B. L'extrémité de la pince dévie à droite. — C. L'extrémité de la pince dévie à gauche. — D. L'extrémité de la pince dévie en haut. — E. L'extrémité de la pince dévie en bas (d'après Wullyamoz).

saires pour faire des épreuves photographiques, cette méthode radioscopique permet d'opérer en suivant radiographiquement la marche de l'opération. Mais alors le matériel opératoire doit être légèrement modifié. En effet, la forme des

instruments chirurgicaux est telle que leur ombre masquerait, au cours de l'intervention, celle du corps à extraire. Le Dr Wullyamoz les coude à angle droit. Dans ces conditions, lorsque l'ombre de la partie coudée de l'instrument coïncide avec celle du corps étranger, c'est que la direction suivie est bonne.

La figure 213 montre une pince coudée et la figure 214 les différents aspects que présente l'ombre observée sur l'écran et les indications chirurgicales qu'on en tire.

Radiographie.

Les méthodes précédentes, applicables dans un certain nombre de cas, ne peuvent fournir de renseignements utiles lorsque, par exemple, le projectile est trop petit, ou lorsque les éclats sont trop nombreux, ou enfin lorsque le blessé examiné dans un centre

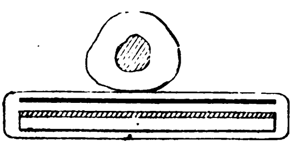


Fig. 215. — Dispositif renforçateur des plaques.

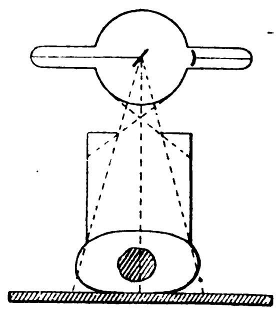


Fig. 216. — Dispositions relatives de l'ampoule, de la plaque et du corps à radiographier.

radiographique doit être opéré dans un autre hôpital.

Ce que nous avons dit pour la radioscopie s'applique à la radiographie, l'écran fluorescent étant remplacé par une plaque photographique placée le plus près possible de l'objet à examiner, l'ampoule étant au contraire assez distante (35 à 70 centimètres suivant les cas), pour éviter la déformation des images.

En général, la plaque est enveloppée dans une pochette

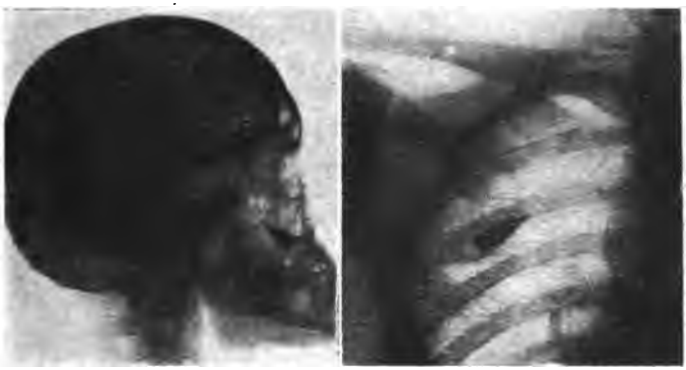


Fig. 217. — Radiographies de balles de fusil dans une mâchoire et dans un thorax (Dr Ledoux-Lebard).

de papier noir et placée immédiatement en dessous du corps, comme l'indique la figure 215. Les plaques, couvertes d'une émulsion très épaisse et très riche en sel d'argent très sensible, sont encore renforcées, lorsqu'il s'agit de radiographier le tronc ou les membres inférieurs, par l'action d'un écran constitué par une lame mince de carton recouverte d'une substance active (platinocyanure de baryum, sulfure de calcium, etc.), que l'on place au contact de la couche sensible de la plaque.



Fig. 218. — Radiographie d'un projectile dans une épaule (Dr Ledoux-Lebard) (1).

(1) Les figures 217, 218, 219 et 221 sont extraites de *la Localisation et l'extraction des projectiles*, par les Drs Ombrédanne et Ledoux-Lebard.

Pour déterminer la position du corps à extraire, les opérations mathématiques qu'il faut effectuer nécessitent une certaine pratique et on a cherché à les rendre presque automatiques par l'emploi de *repéreurs*.

Compas de Hirtz. — Parmi ceux-ci nous ne décrirons



Fig. 219. — Radiographie d'éclats de shrapnell dans une main (Dr Ledoux-Lebard).

que le compas de Hirtz, qui est l'instrument classique de la radiologie.

Le principe consiste à fixer la position du projectile par rapport à trois points de repère arbitraires fournis par le compas.

Pour l'utiliser, il faut obtenir d'abord une épreuve radiographique, puis construire l'épure de restitution, ensuite régler le compas d'après l'épure, enfin utiliser le compas au

cours de l'opération. Disons quelques mots de ces différentes opérations.

Sur le châssis de l'enveloppe contenant la plaque photographique on marque le centre de figure donné par l'intersec-



Fig. 220. — Application du compas de Hirtz sur un blessé.
(Cliché du Dr M. Ménard, de l'hôpital Cochin.)

tion des diagonales. On place la plaque photographique de façon que son centre soit sur la verticale du foyer d'émission des rayons X, deux de ses côtés étant parallèles à la direction suivant laquelle on déplacera ultérieurement l'ampoule.

Les pointes des trois trusquins métalliques circonscrivent la région probable d'incision, et autant que possible on les place dans un même plan horizontal.

Ceci fait, on prend sur la même plaque deux poses en

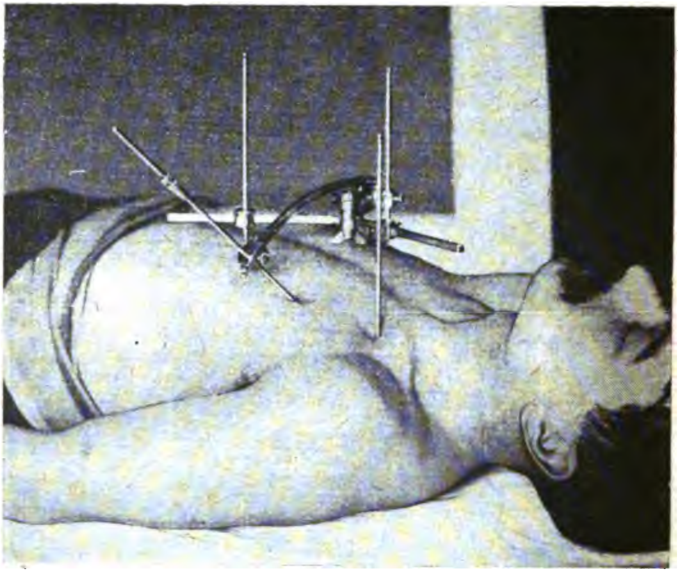


Fig. 221. — Le compas de Hirtz.

(Gravure extraite de *la Localisation et l'extraction des projectiles*, par les Drs Ombrédanne et Ledoux-Lebard.)

décalant l'ampoule à droite, puis à gauche de sa position normale de la même quantité.

La plaque développée, on détermine le centre du cliché, point de rencontre des diagonales, puis deux droites passant par ce centre, *xx'* parallèle au sens de déplacement de l'ampoule, *yy'* perpendiculaire à cette direction (fig. 222).

On applique sur le cliché une feuille de papier calque et on reporte ces deux droites ainsi que les projections *a*, *a'*,

b, *b'*, *c*, *c'*, des trois points de repère et du projectile *p*, *p'*. L'épure s'effectue ensuite de la manière suivante :

Pour la projection horizontale, à une distance quelconque au-dessus de *xx'* traçons une droite parallèle à *xx'*, soit *ff'* par exemple, sur laquelle nous marquons les points *f* et *f'* tels que *o'f* et *o'f'* soient égaux aux déplacements que l'on a fait subir à l'ampoule de part et d'autre de la verticale. Joignons à *f'* les projections de gauche du corps étranger et des repères, et faisons l'opération analogue pour le point *f* et les projections de droite.

Le point de rencontre de *fp'* et de *f'p'* donne la projection horizontale du corps étranger et les points de rencontre des lignes *a'f*, *a'f'*, *b'f*, *b'f'*, *c'f*, *c'f'*, les projections horizontales A', B', C' des repères.

Pour avoir la projection verticale de ces points, portons sur *yy'* une longueur OV égale à la distance de l'ampoule au-dessus du plan de la plaque. Par V menons FF' parallèle à *xx'*, et portons VF et VF' égaux aux déplacements latéraux de l'ampoule.

Menons les lignes de rappel des points *a'a'*, *b'b'*, *c'c'*, *p'p'* et joignons les points correspondants de la ligne de terre aux points F et F' suivant qu'ils correspondent à la prise à gauche ou à droite de la verticale. Les points d'intersection des droites F*c* F'*c* donne la projection verticale de C. Elle doit, comme vérification, être sur la ligne de rappel du point *c'*.

Le compas dont on va maintenant se servir est formé de trois tiges verticales, réglables en longueur, coulissant sur trois bras horizontaux articulés autour d'un même axe. Cet axe sert de pivot à un arc de cercle à concavité inférieure portant une quatrième tige, la *sonde de profondeur*, mobile suivant la normale à cet arc de cercle. Sa longueur totale est égale au rayon de l'arc de cercle

dont le centre, par construction, est dans le plan des trois tiges périphériques quand elles sont à fond de course.

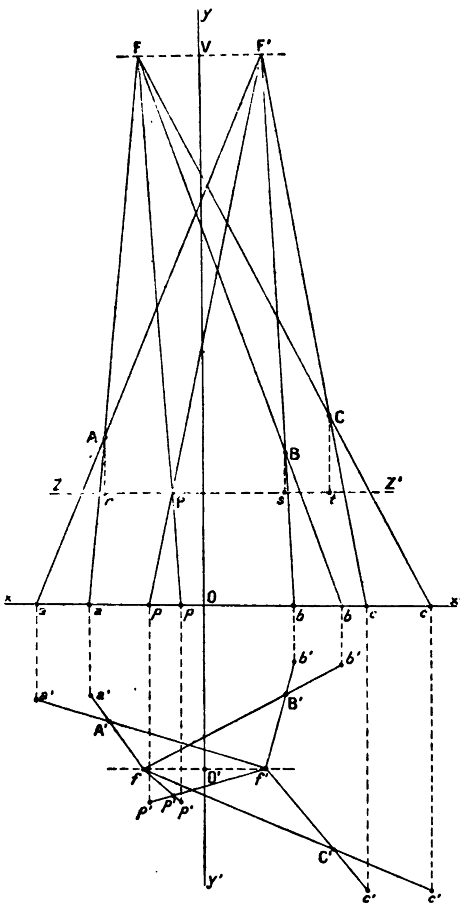


Fig. 222. — Épure de localisation avec le compas de Hirtz.

Pour régler le compas, on place les trois pointes et la sonde de profondeur sur les points correspondants de la projection

horizontale de l'épure. Il faut maintenant régler la hauteur des tiges. Pour cela, on se sert de la projection verticale de l'épure. Par le point P menons l'horizontale et prenons les distances A*r*, B*s*, C*t*, des points A, B, C à cette horizontale. Ces distances représentent la profondeur à laquelle se trouve le plan passant par le corps étranger au-dessous des plans horizontaux passant par les points de repère.

Il suffit alors de raccourcir de la longueur A*r* la tige du repère A, et des longueurs correspondantes les tiges B et C pour avoir réglé le compas.

Au moment de l'intervention, on porte le compas sur le patient, les pointes des trois tiges verticales coïncidant avec les repères marqués sur la peau. La sonde de profondeur descendue sur la peau indique la direction dans laquelle se trouve le projectile. Grâce au secteur qui la porte, le chirurgien peut choisir sa ligne d'incision. En descendant la sonde dans la plaie on a, à chaque instant, la direction à suivre et la profondeur à atteindre. Quand elle est au bout de sa course, elle touche le corps à extraire et la précision, si les opérations ont été bien faites, est de l'ordre du millimètre.

Les opérations en lumière rouge. — La différence des aspects que l'on constate en examinant un objet avec des lumières de diverses couleurs a suggéré à M. Bergonié, correspondant de l'Institut, l'idée d'employer, pour les opérations chirurgicales nécessitant l'emploi des rayons X, une lumière colorée.

Lorsque le chirurgien opère en lumière blanche et doit repérer au cours de l'intervention, sur l'écran au platino-cyanure de baryum, la place des corps étrangers qu'il veut extraire, par suite de la faible luminosité verdâtre de l'écran, les ombres qui trahissent les os, les tissus, etc., sont difficiles à observer. Si on fait l'obscurité, soit en supprimant par un moyen quelconque l'éclairage de

la salle d'opération, soit en examinant l'écran radiographique à l'aide d'une bonnette spéciale (fig. 223), l'œil, qui était placé l'instant auparavant en pleine lumière, reste ébloui et il faut un certain temps pour qu'il s'accoutume à l'obscurité et puisse voir les ombres sur l'écran. L'inconvénient qui en résulte est si grave que, dans un grand nombre d'installations chirurgicales, un aide, constamment armé de la bonnette, suit sur l'écran les progrès de l'opération et guide par ses indications le chirurgien qui reste sans cesse en lumière blanche (fig. 223).

M. Bergonié a employé un autre procédé. La chambre d'opération est éclairée par une lampe électrique colorée donnant une lumière rouge intense. Grâce à la sensibilité de l'œil pour cette partie du spectre, aucune fatigue de la rétine n'est observable, et quand on examine l'écran radiographique vert (lumière complémentaire) il tranche si violemment sur les objets environnants que l'on suit sans aucune difficulté les indications des rayons X dans leurs plus petits détails.



Fig. 223. — Bonnette spéciale pour la radioscopie..

Naturellement, il faut une certaine habitude de cette lumière rouge pour n'en pas être gêné, car elle change considérablement l'aspect des plaies.

Le sang rouge paraît noir, par exemple, et c'est un avantage, car toute tendance à l'asphyxie chez l'opéré est

immédiatement décelée par le noircissement de la plaie et de la face.

Autres procédés de localisation. — En dehors de cette instrumentation spéciale, l'ingéniosité des chercheurs a multiplié les procédés de localisation. La guerre, en rapprochant les compétences, a fait éclore une si grande quantité de techniques, que nous ne pouvons même songer à les énumérer.

TABLE DES MATIÈRES

I

La reconnaissance, le repérage et la signalisation optiques.

II

La guerre aérienne.

III

La guerre sous-marine.

IV

La balistique.

V

La mécanique.

VI

La télégraphie sans fil.

VII

Applications diverses.

CORBEIL. — IMPRIMERIE CRÉTÉ.